

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROJETO DE UMA MESA XY PARA USO EM MÁQUINA DE CORTE POR**  
**JATO DE ÁGUA ABRASIVO DE ULTRA-ALTA PRESSÃO E**  
**ESTUDO DE MÉTODOS ALTERNATIVOS**

Luiz Fernando Karasawa Imai  
Marcelo Kenhiti Kobayashi

São Paulo  
2005

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROJETO DE UMA MESA XY PARA USO EM MÁQUINA DE CORTE POR**  
**JATO DE ÁGUA ABRASIVO DE ULTRA-ALTA PRESSÃO E**  
**ESTUDO DE MÉTODOS ALTERNATIVOS**

Trabalho de formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Luiz Fernando Karasawa Imai

Marcelo Kenhiti Kobayashi

  
Orientador: Amilton Sinatora

Área de Concentração:  
Engenharia Mecânica

São Paulo  
2005

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos à Escola Politécnica pelo suporte, aos familiares e amigos pelo apoio, paciência e compreensão e ao professor Amilton Sinatora, que nos orientou durante a realização deste trabalho.

## RESUMO

As máquinas de corte por jato de água abrasivo apresentam diversas vantagens em relação aos métodos tradicionais de usinagem: grande versatilidade com relação aos materiais usinados, alto grau de acabamento, eliminação de tensões residuais, pequenas forças de corte e rápida configuração, ambientalmente amigável e é um processo altamente disponível, já que os principais insumos são água e abrasivo.

O presente trabalho tem como principais objetivos desenvolver um projeto de uma mesa xy para uso em máquina de corte por jato de água abrasivo e estudar tecnologias alternativas visando a redução de custos e melhorias na eficiência.

No desenvolvimento do projeto da mesa, serão apresentados os princípios de funcionamento, bem como os principais parâmetros que influenciam sua eficiência, qualidade e consumo de insumos, dentre os quais destaca-se a pressão de operação da bomba, o diâmetro do orifício da jóia, o comprimento e o diâmetro interno do bico, as características do material abrasivo e a velocidade transversal de corte. Estes parâmetros foram estabelecidos e avaliados com base em trabalhos previamente realizados como: teses, publicações e livros, que vinculam a eficiência do corte com a profundidade de corte. A mesa projetada tem como principal fator a redução de custos na substituição do comando numérico computadorizado (CNC) por um sistema de movimentação feito com guias lineares de esferas.

No estudo das tecnologias alternativas, foi considerado como fator principal o mecanismo de geração do jato de água. Pode-se destacar como principais modelos o jato de água pulsante ou modulado, que pode ser gerado através de ondas ultrasônicas ou por feixe de laser, e jato cavitante, tendo como fator indutor da cavitação, a geometria do bico. Foram apresentados alguns resultados teóricos e experimentais baseados em artigos estudados.

## ABSTRACT

Abrasive water jet (AWJ) machines offers many advantages against traditional cutting methods, such as the great versatility of the machined materials, high finish quality, the elimination of heat-affected areas, low cutting forces and quick setup, environmental friendly, and it is process highly available.

The present study is mainly focused on the development of a xy table to use with abrasive water jet machines and study alternative technologies aiming for the cost reduction and efficiency improvements.

Functional principles will be presented on the machine project development, as well as its optimization parameters for the efficiency, quality and consumption of energy, water and abrasive. Those parameters are: the operational pump preassure, the orifice jewel diameter, the nozzle lenth and internal diameter, the abrasive material characterists and the cut velocity. Those parameters have been established and evaluated based on publications, papers and books, where the cut efficiency is related to the cut depth. The table projected is focused on cost reduction by the substitution of the computerized numerical control (CNC) by a linear spheres guide movement system.

The main factor considered on the study of alternative technologies was the water jet generation mechanism like the generation of a pulsating water jet or modulated by ultrasonic waves or a laser beam and a cavitating water jet where the main mechanism of cavitation is the nozzle geometry. Some theoretical and experimental results based on studied articles has been presented.

## NOMENCLATURA

$A_h$	taxa de corte
$b_h$	largura do corte
$b_p$	largura da partícula
$C$	velocidade de onda de choque do líquido
$C_0$	velocidade do som na água
$d_0$	diâmetro do orifício
$d_{\text{círculo}}$	diâmetro da projeção do grão
$d_F$	diâmetro do bico
$d_{\text{jato}}$	diâmetro do jato
$d_p$	diâmetro da partícula abrasiva
$d_{PG}$	tamanho médio geométrico da partícula
$d_{p\min}$	projeção mínima do diâmetro
$d_{p\max}$	projeção máxima do diâmetro
$d_{PST}$	diâmetro estatístico da partícula
$d_{SH}$	diâmetro do tudo de entrada
$E_c$	energia cinética das partículas abrasivas esféricas
$E_w$	energia cinética do jato de água
$f_p$	frequência de impacto de partículas abrasivas
$Fr$	Número de Froude
$F_w$	força de impacto teórica do jato de água
$F_{w\text{eff}}$	força de impacto efetiva do jato de água
$g$	constante gravitacional
$h$	altura / profundidade de corte
$h_s$	espessura do material a ser usinado
$H_F$	dureza do material do bico
$H_P$	dureza do material abrasivo
$\dot{I}_p$	comprimento da partícula
$I_w$	fluxo de impulso do jato de água

$l_F$	comprimento do bico
$L_h$	comprimento do corte
$l_{Fopt}$	comprimento ótimo do bico
$\dot{m}$	vazão mássica do abrasivo
$\dot{m}_A$	taxa de fluxo máximo de abrasivo
$\dot{m}_p$	massa da partícula do abrasivo
$\dot{m}_w$	tava de fluxo mássico de água
$N_{corner}$	número de curvas da partícula
$n_{opt}$	número de passes ótimo
$N_p$	número de partículas do abrasivo
$n_p$	número de passes
$P$	pressão da bomba
$P_{ABR}$	parâmetro de avaliação global
$P_{ar}$	perda de pressão pelo fluxo de ar
$P_{amb}$	pressão ambiente
$P_{ATM}$	pressão atmosférica
$P_{mistura}$	pressão na câmara de mistura
$P_{opt}$	pressão ótima da bomba
$P_p$	fator de densidade do material
$P_s$	pressão de estagnação
$P_{sólido}$	perda de pressão pelo transporte das partículas sólidas
$P_{thr}$	pressão mínima de corte
$P_{wh}$	pressão “ <i>water hammer</i> ”
$\dot{Q}_L$	taxa de fluxo volumétrico de ar
$r_{corner}$	raio da curva da partícula
$r_E$	taxa de alongação da partícula
$r_F$	taxa de achatamento da partícula
$S$	fator do formato dos grãos
$S_p$	fator de esfericidade
$S_R$	fator de circularidade
$t$	tempo de exposição

$t_i$	tempo de duração “ <i>water hammer</i> ”
$t_E$	tempo de erosão
$t_L$	tempo de vida do bico
$t_{opt}$	tempo ótimo de corte
$t_p$	espessura da partícula
$v$	velocidade transversal de corte
$v_0$	velocidade efetiva do jato de água
$v_{0th}$	velocidade de saída do jato de água aproximada
$v_L$	velocidade do fluxo de ar
$V_M$	volume do material a ser removido
$v_{opt}$	velocidade ótima de corte
$v_p$	velocidade média da partícula abrasiva
$v_{pipe}$	velocidade do fluxo do bico
$v_{po}$	velocidade inicial do abrasivo
$W_F$	taxa de desgaste do bico
$x$	distância entre o bico e o material
$\alpha$	ângulo de impacto
$\alpha_t$	coeficiente de transferência de energia
$\Delta p$	diferença de pressão
$\varphi$	ângulo de impacto
$\eta_T$	parâmetro global de transferência de energia
$\mu$	coeficiente de eficiência
$\rho_A$	densidade da mistura
$\rho_L$	densidade do ar
$\rho_p$	densidade do material abrasivo
$\rho_w$	densidade da água
$\theta_A$	ângulo do dispositivo de entrada do abrasivo



## LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1	Possíveis resultados obtidos pelo efeito <i>water hammer</i>	51
Tabela 6.2	Interruptores de jatos de água	54

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Sistema Entrainment	3
Figura 1.2	Esquema cabeçote	4
Figura 4.1	Coeficiente $\alpha$ da saída do orifício da jóia	13
Figura 4.2	Estrutura geral de um cabeçote de um sistema para gerar jato de água abrasivo por injeção	14
Figura 4.3	Parâmetros para otimização da geometria interna do cabeçote	15
Figura 4.4	Parâmetros para otimização da distância entre a entrada do abrasivo e a entrada do bico de corte	16
Figura 4.5	Desalinhamento entre o orifício da jóia e o bico de corte	17
Figura 4.6	Influência do comprimento da câmara de mistura na eficiência do corte	18
Figura 4.7	Relação entre a vazão de ar, vazão mássica de abrasivo e diferença de pressões	19
Figura 4.8	Parâmetros de influência na vazão volumétrica de ar	20
Figura 4.9	Características da bomba para jatos de água de alta velocidade	21
Figura 4.10	Influência da pressão da bomba na taxa de desgaste do bico	24
Figura 4.11	Influência do diâmetro médio das partículas abrasivas na taxa do desgaste do bico	24
Figura 4.12	Influência do comprimento do bico na taxa de desgaste	25
Figura 4.13	Fotografia ampliada em corte de um bico após o uso de 6,5 horas	25
Figura 4.14	Influência da dureza dos materiais do bico e do abrasivo na taxa de desgaste do bico	26
Figura 4.15	Modelo do desgaste do bico	27
Figura 4.16	Relação do tempo de uso do bico, perda de massa e performance do jato	27
Figura 4.17	Estimação do tempo de vida de bicos	29
Figura 5.1	Parâmetros de otimização do corte por jato de água	31

Figura 5.2	Relação entre a profundidade de corte e espessura do material a ser usinado	32
Figura 5.3	Relações entre a pressão da bomba e a profundidade de corte	34
Figura 5.4	Pressão mínima de corte em função de diversos parâmetros	35
Figura 5.5	Relação entre o diâmetro do orifício da jóia e profundidade de corte e energia específica de corte	36
Figura 5.6	Relação entre a velocidade transversal e a profundidade de corte	37
Figura 5.7	Relação entre o tempo de exposição e a profundidade de corte	39
Figura 5.8	Relação entre o número de passes e a profundidade de corte	39
Figura 5.9	Relação entre a profundidade de corte e a distância do bico e do material	41
Figura 5.10	Relação entre a profundidade de corte e o ângulo de impacto	42
Figura 5.11	Relação do diâmetro do bico e a profundidade de corte	43
Figura 5.12	Relação entre a profundidade de corte e o comprimento do bico	44
Figura 5.13	Otimização do comprimento do bico	44
Figura 5.14	Relação entre a vazão mássica de abrasivo e a profundidade de corte	45
Figura 5.15	Influência de diversos parâmetros na otimização da vazão de abrasivo	46
Figura 5.16	Relação entre diâmetro da partícula e profundidade de corte	47
Figura 5.17	Relação entre o formato da partícula e a profundidade de corte	48
Figura 5.18	Influência da dureza do material abrasivo na eficiência do jato de água	49
Figura 6.1	Pressão de <i>water hammer</i> e pressão de estagnação versus velocidade	53
Figura 6.2	Configuração geométrica de um bico ultrassônico	56
Figura 6.3	Mecanismo de formação de um jato de água pulsante	56
Figura 6.4	Aparência típica de um jato de água pulsante	57
Figura 6.5	Geração de jato modulado por feixe de laser	58

Figura 6.6	Potência versus diâmetro do bico e velocidade do jato	59
Figura 6.7	Frequência versus comprimento do segmento do jato	60
Figura 6.8	Frequência versus comprimento do segmento do jato	61
Figura 6.9	Bicos cavitantes	62
Figura 7.1	Tampo de pia elíptico padrão	66

# SUMÁRIO

## NOMENCLATURA

## LISTA DE TABELAS

## LISTA DE FIGURAS

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1.</b>	<b>Sistema de Jato de Água Abrasivo .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2.</b>	<b>Vantagens e Desvantagens .....</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>HISTÓRICO .....</b>	<b>7</b>
<b>3.</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>10</b>
<b>4.</b>	<b>GERAÇÃO DE JATO DE ÁGUA ABRASIVO .....</b>	<b>11</b>
<b>4.1.</b>	<b>Propriedades e estrutura de jatos de água de alta-velocidade.....</b>	<b>11</b>
<b>4.1.1.</b>	<b>Velocidade do jato de água .....</b>	<b>11</b>
<b>4.1.2.</b>	<b>Eficiência da transferência do momento .....</b>	<b>11</b>
<b>4.1.3.</b>	<b>Energia cinética de jatos de água a alta-velocidade.....</b>	<b>12</b>
<b>4.2.</b>	<b>Princípios do sistema de mistura por injeção de abrasivo no jato de água .....</b>	<b>13</b>
<b>4.2.1.</b>	<b>Princípios gerais do projeto .....</b>	<b>13</b>
<b>4.2.2.</b>	<b>Parâmetros internos de projeto .....</b>	<b>15</b>
<b>4.2.2.1.</b>	<b>Distância entre a saída do orifício e a entrada do bico.....</b>	<b>15</b>
<b>4.2.2.2.</b>	<b>Distância entre a entrada do abrasivo e a entrada do bico de corte .. .....</b>	<b>16</b>
<b>4.2.2.3.</b>	<b>Alinhamento entre o orifício da jóia e o bico.....</b>	<b>16</b>
<b>4.2.2.4.</b>	<b>Comprimento da câmara de mistura .....</b>	<b>18</b>
<b>4.3.</b>	<b>Sistema de sucção de abrasivo .....</b>	<b>18</b>
<b>4.3.1.</b>	<b>Diferença de pressão para o transporte de abrasivo .....</b>	<b>18</b>
<b>4.3.2.</b>	<b>Vazão do ar.....</b>	<b>20</b>
<b>4.3.3.</b>	<b>Velocidade de entrada da partícula abrasiva.....</b>	<b>21</b>
<b>4.4.</b>	<b>Desgaste do bico em sistemas de injeção.....</b>	<b>22</b>
<b>4.4.1.</b>	<b>Considerações gerais do desgaste do bico.....</b>	<b>22</b>
<b>4.4.2.</b>	<b>Diâmetro de saída do bico .....</b>	<b>22</b>
<b>4.4.2.1.</b>	<b>Observações preliminares .....</b>	<b>22</b>

4.4.2.2.	Taxa de desgaste do bico .....	23
4.4.2.3.	Parâmetros de processo .....	23
4.4.2.4.	Influência da dureza .....	25
4.4.3.	Perda de massa do bico .....	26
4.4.4.	Mudança da geometria do furo do bico .....	28
4.4.5.	Estimativa do tempo de vida do bico .....	28
5.	PARÂMETROS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROJETO .....	30
5.1.	Definição dos parâmetros .....	30
5.1.1.	Parâmetros de avaliação .....	31
5.2.	Parâmetros hidráulicos .....	33
5.2.1.	Pressão da bomba .....	33
5.2.1.1.	Observações gerais .....	33
5.2.1.2.	Pressão mínima de corte .....	34
5.2.1.3.	Aspectos de otimização .....	35
5.2.2.	Diâmetro do orifício da jóia .....	36
5.2.2.1.	Considerações gerais .....	36
5.2.2.2.	Aspectos para otimização .....	36
5.3.	Parâmetros de corte .....	37
5.3.1.	Velocidade transversal .....	37
5.3.1.1.	Considerações gerais .....	37
5.3.1.2.	Tempo de exposição .....	38
5.3.1.3.	Aspectos para otimização .....	38
5.3.2.	Número de passes .....	38
5.3.2.1.	Observações gerais .....	38
5.3.2.2.	Aspectos para otimização .....	40
5.3.3.	Distância do bico de corte e do material .....	40
5.3.3.1.	Observações gerais .....	40
5.3.3.2.	Aspectos de otimização .....	41
5.3.4.	Ângulo de impacto .....	41
5.4.	Parâmetros de mistura .....	42
5.4.1.	Diâmetro do bico .....	42
5.4.1.1.	Observações gerais .....	42

5.4.1.2.	Aspectos para otimização.....	43
5.4.2.	Comprimento do bico .....	43
5.4.2.1.	Observações gerais.....	43
5.4.2.2.	Aspectos para parâmetro .....	44
5.5.	Parâmetros do abrasivo.....	45
5.5.1.	Vazão mássica do abrasivo.....	45
5.5.1.1.	Observações gerais.....	45
5.5.1.2.	Aspectos de otimização .....	46
5.5.2.	Diâmetro da partícula abrasiva.....	47
5.5.2.1.	Observações gerais.....	47
5.5.2.2.	Aspectos para otimização .....	47
5.5.2.3.	Formato da partícula abrasiva .....	48
5.5.3.	Dureza do abrasivo .....	48
6.	TECNOLOGIAS ALTERNATIVAS.....	50
6.1.	Jato Pulsante ou Modulado.....	50
6.1.1.	Jato de água pulsante natural.....	55
6.1.2.	Jato de água pulsante forçado .....	56
6.1.2.1.	Ultra-sônico .....	56
6.1.2.2.	Laser.....	57
6.2.	Jato Cavitante .....	62
7.	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO .....	64
7.1.	Parâmetros hidráulicos .....	64
7.2.	Parâmetros de corte.....	64
7.3.	Parâmetros de mistura .....	65
7.4.	Parâmetros do Abrasivo.....	65
7.5.	Custos de Projeto .....	66
7.6.	Custo de operação/Exemplo de aplicação.....	66
8.	RESULTADOS E CONCLUSÕES .....	67
9.	ANEXO .....	69
10.	.....	77
11.	.....	78
12.	.....	79

<b>13.</b>	.....	<b>80</b>
<b>14.</b>	.....	<b>81</b>
<b>15.</b>	<b>LISTA DE REFERÊNCIAS .....</b>	<b>82</b>
<b>16.</b>	<b>LISTA DE MATERIAIS PESQUISADOS.....</b>	<b>83</b>



## 1. INTRODUÇÃO

Jatos de água de ultra-alta pressão são usados em muitas aplicações na indústria. Uma utilização especial consiste no uso da avançada tecnologia para corte de materiais. Neste processo, a água é pressurizada por uma bomba (400 MPa ou mais) fluindo através de tubulação de parede espessa até um bocal constituído de uma jóia (rubi, safira ou diamante), cujo diâmetro é inferior ao milímetro. Neste bocal, a energia estática da água é convertida em energia cinética do jato de água, jato este que pode atingir a velocidade de 800 m/s, o que corresponde a aproximadamente duas vezes e meia a velocidade do som no ar. Com esta alta energia, o jato atinge a superfície do material a ser trabalhado e penetra no mesmo. Dependendo das propriedades do material, o jato projeta-se através do mesmo e forma uma ranhura, a qual é tão larga quanto o diâmetro do jato. Um tanque coleta a água após a operação de corte e absorve a energia remanescente do jato de água, bem como os detritos resultantes de erosão do material alvo de corte.

O corte com jato de ultra-alta pressão é diferente das aplicações usuais de jatos de água de alta pressão tais como limpeza, remoção de pinturas ou demolição. Para cortar um material, o jato que atua como uma faca ou lâmina de serra, precisa ser ligado e desligado para cada contorno a ser cortado. Portanto, este processo requer diferentes equipamentos.

Pela adição de abrasivos ao jato de água, o desempenho do processo de corte pode ser consideravelmente melhorado. O método mais comum é o processo de corte por jato de água abrasivo (AWJ – Sigla de “Abrasive Water Jet”), onde abrasivos são misturados à água após ela ter deixado o bocal. A alta velocidade da água desenvolve um vácuo em uma câmara de mistura onde o mesmo passa. O vácuo é suficiente para sugar os abrasivos de uma tubulação para a câmara na corrente de água que a atravessa. As partículas sólidas são então movidas pelo jato de água e aceleradas à velocidade de 600 m/s. A água e os abrasivos são focalizados no bocal secundário na saída da câmara, antes do jato atingir o alvo. O corte por jato abrasivo pode ser usado para materiais duros e friáveis, e vem aumentando o escopo de suas aplicações.

## 1.1. Sistema de Jato de Água Abrasivo

Um sistema AWJ típico é composto dos seguintes componentes conforme mostrado na figura 1.1: unidade de tratamento de água, bomba, intensificador de alta pressão, sistema de criação do jato de água, sistema de alimentação de abrasivo e acessórios de suporte como válvulas de controle e mangueira. De maneira complementar, é necessário um dispositivo para manipular o bico a velocidades transversais pré-determinadas ao longo do caminho requerido. Esse dispositivo é tipicamente, um braço de robô. Um coletor é usado abaixo da peça de trabalho para agir como uma espécie de amortecedor, reduzir a velocidade do jato e coletar a água do jato.

De acordo Momber e Kovacevic (1998), existem jatos de água puros, jatos de água com aditivos solúveis e jatos de água com abrasivos não solúveis ou jatos de água abrasivos. Um jato de água puro utiliza somente um fluxo pressurizado de água para cortar materiais moles.

De acordo com o tipo de geração e com as maneiras de se adicionar os abrasivos, os AWJ podem ser sub-divididos em duas categorias:

- Sistema *Entrainment*: num sistema de jato de água abrasivo *entrainment*, um orifício é utilizado para formar o jato de água de uma água de alta pressão, conforme mostrada na figura 1.2. O jato de água é então misturado com abrasivos numa câmara de mistura próxima ao orifício. As partículas do abrasivo são aceleradas através do fluxo e fluem para fora do bico com o fluxo para executar o corte. Este tipo de sistema resulta em desgaste somente no cabeçote de corte ou bico, pois os abrasivos podem não se misturar corretamente com a água, afetando assim a performance do corte.

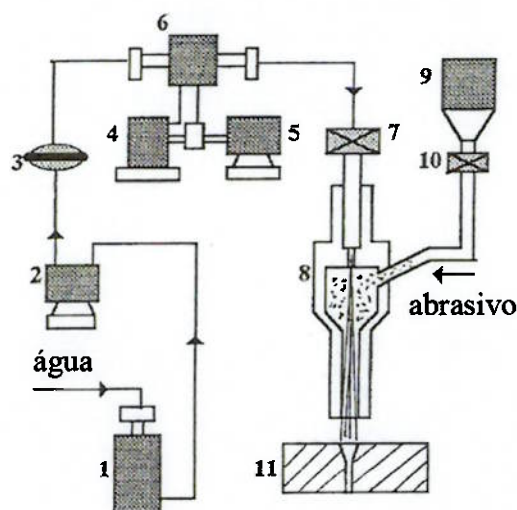


Figura 1.1: Sistema Entrainment. (1 – Unidade de tratamento de água; 2 – Bomba impulsora; 3 – Filtro; 4 – Reservatório de óleo; 5 – Motor da bomba hidráulica; 6 – Intensificador da água; 7 – Válvula liga/desliga; 8 – Cabeçote de corte; 9 – Alimentador do abrasivo; 10 – Válvula de medição do abrasivo; 11 – Peça de trabalho) [2]

- Sistema de bombeamento direto: num sistema de bombeamento direto, os abrasivos são misturados com a água num estágio anterior ao bombeamento de alta pressão, formando um jato abrasivo em pasta (*ASJ* – Sigla de “Abrasive Slurry Jet”) através do bico. Este sistema tem como vantagem a mistura do abrasivo através da água e resulta em desgaste em todo o sistema, limitando-o a pressões relativamente baixas.

A figura 1.2 é uma ilustração esquemática do conjunto do cabeçote de corte de um sistema de jato de água *entrainment* e o princípio básico de formação do jato. Conforme mencionado anteriormente, um pequeno orifício com diâmetro menor de até 0,1 mm que é usado para gerar o jato de água de uma água de alta pressão. A alta velocidade do jato cria um vácuo no qual os abrasivos são sugados do tubo de suprimento de abrasivo e mistura-os com a água na câmara de mistura. Parte do momento do jato de água é transferida então para o abrasivo, aumentando rapidamente sua velocidade. Como resultado, obtém-se um fluxo de alta velocidade de abrasivos deixando o bico e executando o corte na peça de trabalho.

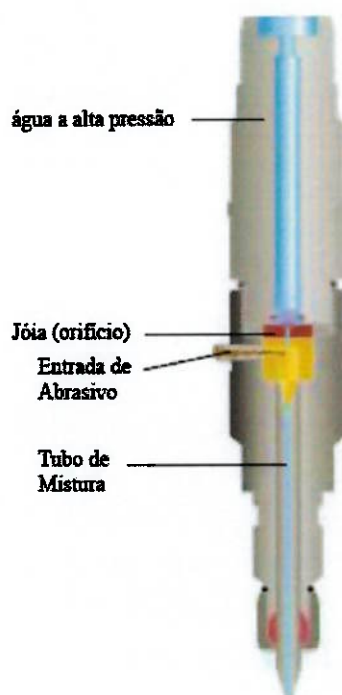


Figura 1.2: Esquema Cabeçote [2].

## 1.2. Vantagens e Desvantagens

Quando comparados com outros processos de usinagem tradicionais ou não, a tecnologia de AWJ oferece as seguintes vantagens segundo Wang (2003):

- *Alta versatilidade de usinagem.* Um sistema de AWJ pode cortar virtualmente qualquer material. É particularmente útil para usinar diversos materiais de difícil usinagem como aços tratados, ligas de titânio, cobre, latão e alumínio, como também materiais britados como quartzo, vidros e cerâmica.
- *Habilidade de produzir contornos.* O AWJ é excepcionalmente bom em usinagem em duas dimensões. Com ele é possível cortar formatos muito complicados e relevos de qualquer ângulo em adição ao perfil tridimensional por se tratar de um processo unidirecional.
- *Quase nenhum calor gerado.* O calor gerado é instantaneamente eliminado pela água. Como resultado, não ocorre uma elevação de temperatura na peça de trabalho. Isto é especialmente útil para cortar materiais termicamente sensíveis onde o excesso de calor pode mudar as propriedades do material.

- *Pequenas forças de corte e rápida configuração.* As forças de corte são bem pequenas. Na maioria dos casos, materiais planos podem ser posicionados diretamente em cima da mesa de corte sem a necessidade de fixação. Além disso, não ocorre mudança de ferramenta, não há necessidade de programar mudanças de ferramentas e qualificar fisicamente múltiplas ferramentas.
- *Ambientalmente amigável.* O corte por AWJ não produz poeira ou partículas que sejam prejudiciais quando inaladas. É um dos métodos de usinagem mais ambientalmente amigáveis. Muitos sistemas de jato de água abrasivo utilizados na indústria alimentícia utilizam óleo vegetal para lubrificação. O abrasivo utilizado e o refugo podem ser depositados em aterros sanitários.
- *Disponibilidade.* Como a água é o fluido de trabalho e os materiais mais comumente utilizados como abrasivos, a granada e a sílica estão a custo baixo, o processo é altamente disponível.

Enquanto o AWJ possui diversas diferentes vantagens sobre os outros processos, ele também apresenta algumas limitações ao que se pode cortar. Abaixo estão listadas algumas limitações e breves descrições:

- *Alto custo de capital inicial e custo operacional.* É estimado que o investimento primário num sistema de AWJ fique em torno de US\$ 50.000,00 a US\$ 500.000,00. A operação e os custos de manutenção são de pelo menos US\$ 10,00 a US\$ 30,00 por hora, tornando o corte por jato de água abrasivo mais caro do que outras formas não tradicionais de usinagem, como o plasma e o corte a laser.
- *O ruído associado ao corte por jato de água abrasivo.* O processo de corte envolve tanto ruídos mecânicos como aerodinâmicos. O ruído mecânico vem primariamente do motor elétrico e da bomba, enquanto o ruído aerodinâmico vem do jato livre viajando a altas velocidades. Isto ocorre especialmente quando grandes distâncias são utilizadas. Existe também grande ruído substancial gerado quando o jato atinge o coletor.
- *Capacidade limitada de processamento.* Possui capacidade limitada em termos da espessura dos materiais que podem ser cortados. Quando a peça é

muito espessa, o jato pode não conseguir penetrar, o que ocasiona a formação de uma grande bolsa na parte de baixo da ranhura. Ocasionalmente, também, uma indesejada formação de ondulação na superfície de corte. Além disso, como todos os outros processos de corte por jato, o jato de água pode produzir um afunilamento na peça, isto é, as duas paredes da ranhura não estão paralelas uma da outra, causando uma imprecisão dimensional.

- *O desgaste do bico.* O bico de um jato de água abrasivo é uma das partes mais críticas e que podem influenciar na performance técnica e econômica do sistema. Ele é exposto a um constante desgaste durante o processo de usinagem. O grande desgaste do bico do AWJ causa uma mistura incompleta das partículas abrasivas com o jato de água de alta velocidade, resultando numa deterioração da habilidade de corte, baixa qualidade da superfície e uma pobre precisão geométrica da peça. Bicos típicos feitos de carbetto de tungstênio são consumidos em cerca de 4 horas numa pressão de operação de 240 MPa. Muitas variáveis podem alterar a taxa de desgaste do bico afetado.

## 2. HISTÓRICO

O Dr. Norman C. Franz, engenheiro florestal da Universidade de Columbia, EUA, é considerado o pai do jato de água. Ele foi a primeira pessoa que estudou o uso de água a ultra-alta pressão (ultra-high pressure – UHP) como uma ferramenta de corte. O termo UHP é definido como mais de 30.000 psi. Ele queria encontrar meios para cortar árvores espessas em toras de madeira. No início da década de 50, Franz, primeiramente, colocou grandes pesos numa coluna de água, forçando, assim, a passagem da água através de um pequeno orifício. Ele obteve pequenos pulsos de pressões bem altas (geralmente muito mais altas das que as atualmente utilizadas), e conseguiu cortar madeira e outros materiais. Seus estudos posteriores envolveram fluxos mais contínuos de água, mas ele encontrou dificuldade para obter altas pressões contínuas. Além disso, a vida dos componentes era medida em minutos e não semanas ou meses como é atualmente. Ele patenteou o sistema de corte com água pressurizada em 1968.

O Dr. Franz nunca conseguiu fazer um cortador de toras para produção e, ironicamente, hoje o processo de corte de madeira é a menor aplicação para a tecnologia UHP. Entretanto, ele conseguiu provar que um jato de água concentrado, a uma alta velocidade, possui um grande poder de corte; poder este, que poderia ser utilizado em inúmeras aplicações muito além do que o Dr. Franz poderia imaginar.

O uso industrial de jatos de água de ultra-alta pressão começou no início da década de 70. Foi descoberto que, para pressões entre 40.000 e 60.000 psi (276 e 414 MPa), um jato de água de aproximadamente 0,1 mm de diâmetro poderia cortar desde papelão até barras de cereal. Foram desenvolvidas máquinas especiais de produção em série para resolver problemas de fabricação relacionados a materiais que haviam sido previamente cortados por lâminas ou cortadores mecânicos.

Os primeiros sistemas de corte por jato de água eram caros e, freqüentemente, de difícil manutenção, mas alternativas como lâminas e cortadores mecânicos eram ainda mais caros e problemáticos. Conseqüentemente, o jato de água ganhou rapidamente aceitação como uma solução para corte de materiais desafiadores. Em adição aos sistemas de produção em série de propósito específico, formou-se um grande número de firmas especializadas com o propósito de aplicar a tecnologia a

aplicações variadas. Estas firmas, tipicamente, cortavam borracha, substâncias e outros materiais em formatos específicos para produtos manufaturados, produtos customizados e outras aplicações.

Muito embora o jato de água fosse a solução ideal para cortar materiais moles problemáticos, ele não tinha muito sucesso em cortar materiais como metais e cerâmicas. Então, no início da década de 80, nasceu o jato de água abrasivo. Em adição aos componentes do jato de água padrão, um bocal especial foi desenvolvido. Além de criar o jato de água, o bocal introduzia uma pequena porção de pó abrasivo ao jato por aspiração. Com a ajuda de abrasivos como granada, o jato de água podia ser utilizado em materiais de difícil usinagem como titânio, vidro e cerâmicas.

Assim como os primeiros jatos de água, o primeiro sistema de jato de água abrasivo eram caros para operar e manter e eram utilizados somente em aplicações especiais como painéis de asa de titânio para aeronaves militares, ou formatos especiais de vidros e cerâmicas. Estes sistemas cortavam no ar para que o operador pudesse visualizar o jato e isso permitia uma ajuste manual da taxa de alimentação enquanto executava manobra de curva e cantos. Entretanto, estes sistemas produziam alto ruído e, freqüentemente, produziam uma nuvem de cavaco e pó abrasivo que cobriam tudo a sua volta. Isto limitou os primeiros sistemas de jato de água abrasivo para firmas especializadas que empregavam operadores altamente treinados.

No início dos anos 90, o Dr. John Olsen, um pioneiro na indústria de corte por jato de água, começou a explorar o conceito de corte por jato de água abrasivo como uma alternativa prática às máquinas tradicionais. O objetivo era desenvolver um sistema de corte por jato de água abrasivo sem todo aquele ruído, poeira e complexidades que atingiam os primeiros sistemas e manteve-os em locais extremamente especializados. O novo sistema também precisava ser simples o suficiente para manter sem um treinamento extenso ou especial. Finalmente, e talvez mais importante, o Dr. Olsen visionou um sistema controlado por computador que eliminaria a necessidade de um operador treinado e programação de tentativa e erro. Se um sistema desses pudesse permitir que um operador sem treinamento fosse capaz de produzir um componente individual em especificações precisas na primeira tentativa, a máquina poderia ser utilizada por milhares de pequenas empresas para fabricar componentes únicos e de pequena escala.



O Dr. Olsen juntou-se ao Dr. Alex Slocum do Instituto Massachusetts de Tecnologia com a finalidade de projetar o sistema mecânico. Ele utilizou resultados de testes de corte e modelos teóricos de corte originalmente propostos pelos pesquisadores na Universidade de Rhode Island como um guia sobre desenvolvimento de um guia de controle único.

O resultado era um sistema controlado por um PC acoplado a uma mesa de corte X-Y com partes que poderiam cortar embaixo d'água para eliminar o ruído excessivo e a poeira. Este foi o primeiro sistema de corte por jato de água abrasivo projetado especialmente para pequena escala e mercado de máquinas de produção limitada.

### **3. OBJETIVOS**

Os objetivos principais deste trabalho de conclusão de curso são: projetar uma mesa de movimentação para uso com uma máquina de corte por jato de água abrasivo de custos menores aos já existentes no mercado, sem perdas significativas de eficiência e qualidade; e estudar métodos alternativos de geração jatos de água com potenciais de usinagem equivalentes ou superiores.

No desenvolvimento do projeto da mesa, serão estudados os princípios de funcionamento, bem como os principais parâmetros que influenciam sua eficiência, qualidade, consumo de insumos e custo.

Para as tecnologias alternativas serão pesquisados e estudados artigos e publicações focando nas diferentes maneiras de se gerar um jato de água com potencial, eficiência e qualidade equivalentes ou superiores ao jato de água abrasivo.

## 4. GERAÇÃO DE JATO DE ÁGUA ABRASIVO

Este presente capítulo, baseia-se em estudos elaborados por Momber e Kovacevic (1998).

### 4.1. Propriedades e estrutura de jatos de água de alta-velocidade

#### 4.1.1. Velocidade do jato de água

A aceleração de um certo volume de água pressurizada por um orifício, gera jatos em altíssimas velocidades. Da equação de Bernoulli temos:

$$P_{ATM} + \frac{\rho_w}{2} \cdot v_0^2 + \rho_w \cdot g \cdot h_1 = P + \frac{\rho_w}{2} \cdot v_{pipe}^2 + \rho_w \cdot g \cdot h_2 \quad (4.1)$$

Com  $h_1=h_2$ ,  $P_{ATM} \ll P$  e  $v_0 \gg v_{pipe}$ , a velocidade de saída do jato de água é aproximadamente dada por:

$$v_{0th} = \sqrt{\frac{2 \cdot P}{\rho_w}} \quad (4.2a)$$

$$v_0 = \mu \cdot v_{0th} = \mu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P}{\rho_w}} \quad (4.2b)$$

Onde  $\mu$  é o coeficiente de eficiência, caracterizado pela perda de momento devido ao atrito da água com as paredes, turbulência do fluido e compressibilidade.

#### 4.1.2. Eficiência da transferência do momento

Conforme mostrado no item anterior, temos que  $\mu = v_0/v_{0th}$ , assim os valores de  $\mu$  podem ser obtidos através de medições de velocidade do jato real. Através de

experimentos, os valores de  $\mu$  situam-se entre 0,85 e 0,98, dependendo de diversos fatores, como pressão da bomba e geometria do orifício da jóia.

Uma outra maneira de estimar a velocidade do jato de água, bem como o coeficiente de eficiência é através da medição da força de impacto do jato. O impulso teórico de um escoamento fluido é:

$$\dot{I}_w = \dot{m}_w \cdot v_{0th} = F_w \quad (4.3)$$

Assim, se o diâmetro do jato for medido independentemente, temos:

$$\mu = \frac{v_0}{v_{0th}} = \mu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot F_{weff}}{\pi \cdot P \cdot d_{jato}^2}} \quad (4.4)$$

#### 4.1.3. Energia cinética de jatos de água a alta-velocidade

A energia cinética de jatos de água a alta-velocidade ao deixar o orifício da jóia é dada por:

$$E_w = \frac{1}{2} \cdot \dot{m}_w \cdot v_0^2 \cdot t \quad (4.5)$$

Onde  $\dot{m}_w = \frac{\pi}{4} \cdot d_0^2 \cdot v_0 \cdot \rho_w$ , que juntamente com a equação 5.2b obtemos:

$$E_w = \alpha \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_0^2 \cdot \mu^3 \cdot \left[ \sqrt{\frac{2P}{\rho_w}} \right]^3 \cdot \rho_w \cdot t = \frac{\alpha \cdot \pi \cdot \mu^3}{\sqrt{2 \cdot \rho_w}} \cdot d_0^2 \cdot P^{1,5} \cdot t \quad (4.6)$$

Na equação acima apresentada,  $\alpha$  é um número adimensional que considera a redução da vazão mássica da água devido a mudanças repentinas nas condições

fluido-mecânicas na saída do orifício, bem como a redução da velocidade do jato devido ao atrito com a parede do orifício da jóia.

Valores estimados para  $\alpha$  são obtidos através da medição da vazão mássica da água e relacionado com a vazão mássica teórica. A figura 4.1 apresenta valores típicos de  $\alpha$  para jóias de safira com canto vivo.

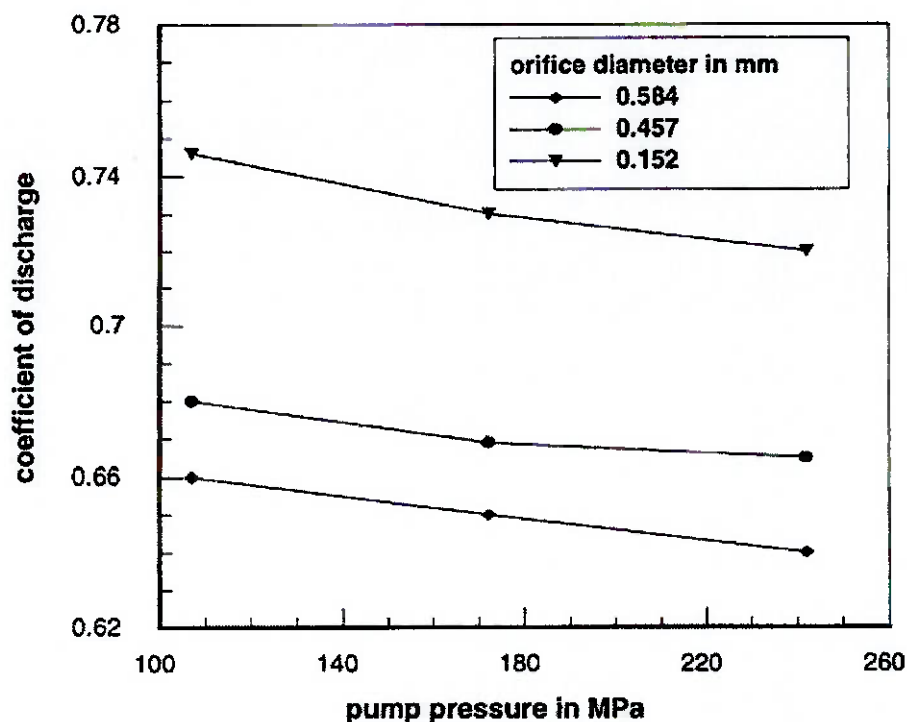


Figura 4.1: Coeficiente  $\alpha$  da saída do orifício da jóia.

## 4.2. Princípios do sistema de mistura por injeção de abrasivo no jato de água

### 4.2.1. Princípios gerais do projeto

Em sistemas de jato de água com mistura por injeção, as partículas de abrasivo, a água em alta velocidade e o ar entram no cabeçote por diferentes lugares. No cabeçote estas substâncias são misturadas e as partículas de abrasivo, juntamente com o ar são aceleradas. Dessa forma, obtém-se o jato de água abrasivo.

Existe uma série de demandas a serem supridas pelo sistema de geração deste jato de água:

- Aceleração ótima das partículas de abrasivo;
- Alta densidade energética do jato de água gerado;
- Baixo desgaste dos componentes do sistema, principalmente da jóia e do bico;
- Performance confiável;
- Funcionamento simples.

A figura 4.2 ilustra um sistema generalizado para a geração de jato de água abrasivo por injeção.

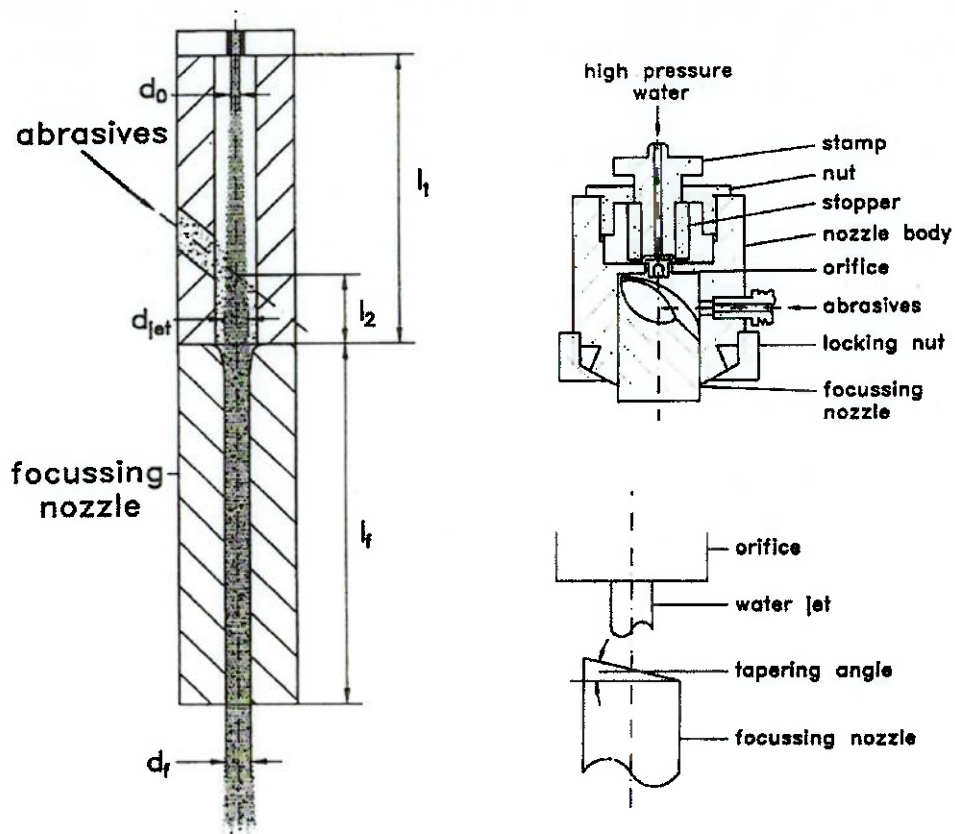


Figura 4.2: Estrutura geral de um cabeçote de um sistema para gerar jato de água abrasivo por injeção.

O transporte das partículas de abrasivo para câmara de mistura é feito através de um sistema pneumático. Este tipo de sistema baseia-se nas seguintes características: entrada de abrasivo e de água a alta velocidade, criação de uma pressão de sucção

devido à passagem da água pela câmara de mistura que suga o abrasivo e o ar, e por último, estas fases são misturadas, aceleradas, concentradas e focadas no bico de corte.

A entrada da água no cabeçote é geralmente feita por cima e de forma centralizada, e, a do abrasivo, é feita de forma radial por uma única entrada na câmara de mistura.

#### 4.2.2. Parâmetros internos de projeto

##### 4.2.2.1. Distância entre a saída do orifício e a entrada do bico

O critério utilizado para otimizar a distância entre a saída do orifício e a entrada do bico é a “capacidade de corte” do jato formado. A figura 4.3 mostra alguns parâmetros para a otimização dessa distância. Devemos observar que para um projeto, a escolha correta dessa distância pode ocasionar uma variação de até 80% na capacidade de corte.

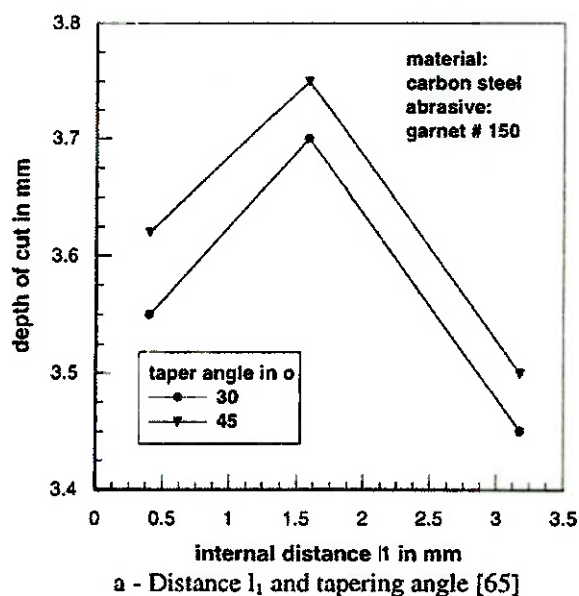


Figura 4.3: Parâmetros para otimização da geometria interna do cabeçote.

#### 4.2.2.2. Distância entre a entrada do abrasivo e a entrada do bico de corte

Para otimizar a distância entre a entrada do abrasivo e a entrada do bico, o critério utilizado é o tempo de perfuração, um parâmetro bem parecido com o utilizado na otimização da distância entre a saída do orifício da jóia e a entrada do bico de corte. A figura 4.4 mostra a relação de tempo de perfuração e a distância entre a entrada do abrasivo e entrada do bico. Foi observado que, para diâmetros do furo interno do bico grandes ( $d_f = 3,175$  mm), a distância em questão pode causar uma variação de até 30% no tempo de perfuração, porém, para pequenos furos, esta variação é bem menos significativa.

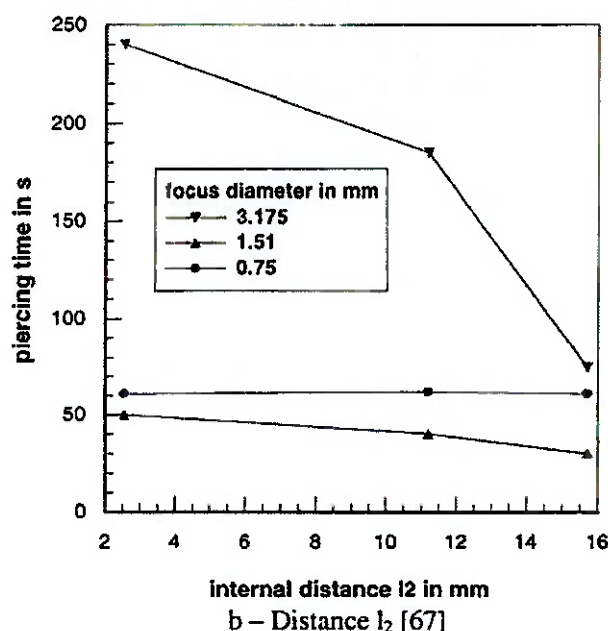


Figura 4.4: Parâmetros para otimização da distância entre a entrada do abrasivo e a entrada do bico de corte.

#### 4.2.2.3. Alinhamento entre o orifício da jóia e o bico

Uma característica essencial para a eficiência do jato de água abrasivo é o alinhamento entre o orifício da jóia e o bico. Existem dois tipos de desalinhamento: o desalinhamento linear e o desalinhamento angular. Ambos podem causar um desgaste excessivo no bico e, conseqüentemente, reduzindo a vida útil do mesmo.



O desalinhamento linear é caracterizado pela formação de dois eixos (do orifício e do bico) paralelos, porém não colineares. Este tipo de desalinhamento deve ser controlado através de especificações de tolerâncias, tanto para o orifício como para a sua base de apoio. Estas tolerâncias devem garantir que o desalinhamento linear seja no máximo de  $51\mu\text{m}$ .

O desalinhamento angular afeta a eficiência do corte da seguinte maneira: o desalinhamento força o jato a se chocar contra a parede do bico antes de sair, resultando em uma aceleração assimétrica e uma distribuição de abrasivo não uniforme, deteriorando sua performance. Para pequenos desalinhamentos, a eficiência do corte não é afetada de maneira significativa. Para um orifício típico, esta tolerância é de aproximadamente  $1^\circ$ .

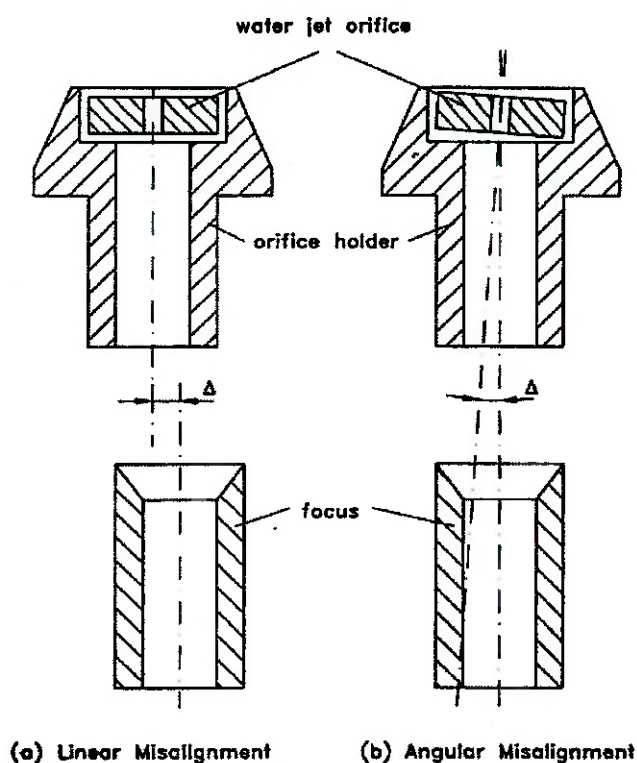


Figura 4.5: Desalinhamento entre o orifício da jóia e o bico de corte.

#### 4.2.2.4. Comprimento da câmara de mistura

O comprimento da câmara de mistura influi diretamente na eficiência do corte. Influência esta, que pode chegar a uma variação de até 15%. A figura 4.6 mostra a relação entre a taxa de remoção de material e o comprimento da câmara de mistura.

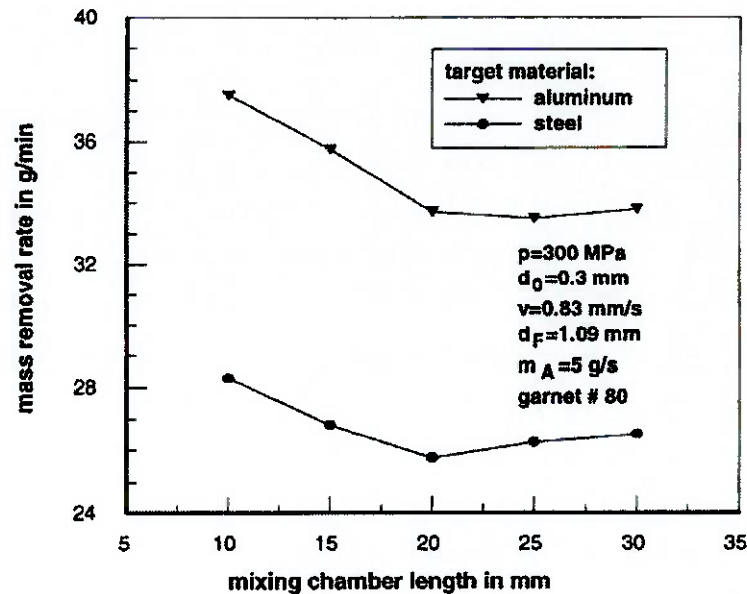


Figura 4.6: Influência do comprimento da câmara de mistura na eficiência do corte.

O gráfico mostra uma relação proporcional direta entre o comprimento da câmara de mistura e a eficiência do corte até um comprimento próximo de 20 mm, após este valor, se mantém praticamente constante.

### 4.3. Sistema de sucção de abrasivo

#### 4.3.1. Diferença de pressão para o transporte de abrasivo

Em cabeçotes de sistemas de jato de água abrasivo por injeção, o transporte do abrasivo é feito por um determinado volume de ar injetado devido à diferença de pressão entre a câmara de mistura e o ar atmosférico:

$$\Delta P = P_{amb} - P_{mistura} \quad (4.7)$$

Em sistemas de transporte pneumáticos, esta diferença de pressão é igual à soma das perdas de pressão do ar e a perda devido ao transporte das partículas sólidas, assim:

$$\Delta P = P_{ar} - P_{sólido} \quad (4.8)$$

Para uma entrada com diâmetro fixo temos:

$$\Delta P = a_1 \cdot \dot{Q}_L^2 + a_2 \cdot m_A \cdot \dot{Q}_L \quad (4.9)$$

A figura 4.7 mostra a relação entre o volume de ar e a diferença de pressões levantadas experimentalmente. A pressão de sucção na câmara de mistura aumenta conforme a pressão da bomba aumenta e o comprimento da câmara diminui.

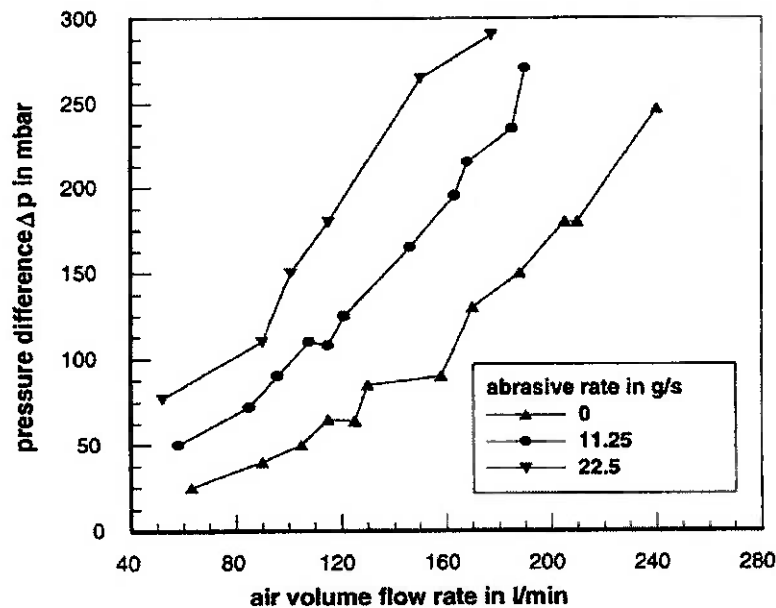


Figura 4.7: Relação entre a vazão de ar, vazão mássica de abrasivo e diferença de pressões.

### 4.3.2. Vazão do ar

A vazão volumétrica do ar depende de diversos parâmetros: a pressão da bomba, a vazão mássica de abrasivo, o formato da câmara de mistura, o diâmetro do bico e o diâmetro da entrada de abrasivo. A figura 4.8a ilustra a influência da pressão da bomba e do diâmetro do bico. A vazão volumétrica de ar cresce de maneira proporcional à raiz quadrada da pressão da bomba, assim:

$$\dot{Q}_L = a_3 \cdot \sqrt{P} \quad (4.10)$$

A figura 4.8b ilustra a vazão volumétrica de ar em função do diâmetro do bico e da vazão mássica de abrasivo. A taxa de entrada de ar decresce significativamente com o aumento da vazão mássica de abrasivo. Mesmo para taxas pequenas (3,2 g/s), o volume de ar é reduzido em até 50%.

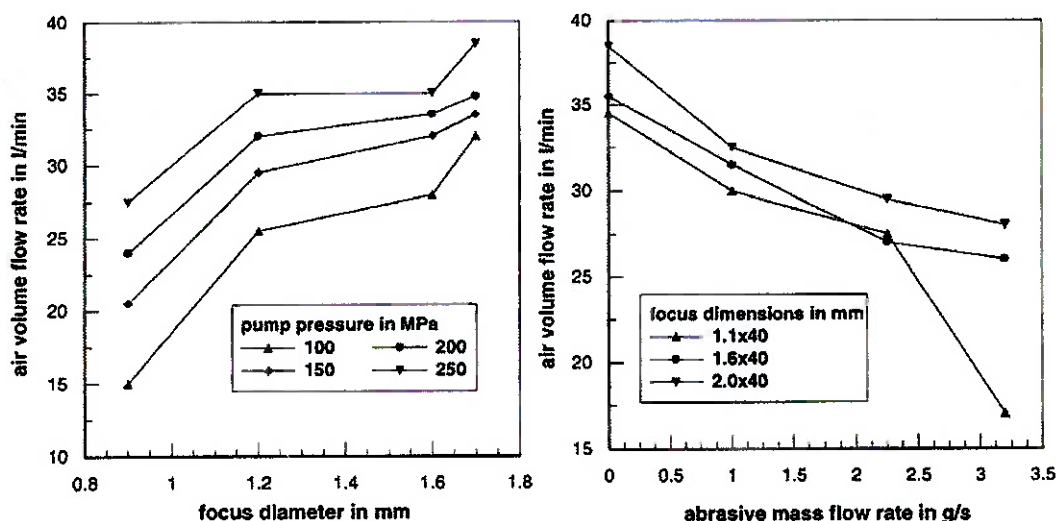


Figura 4.8: Parâmetros de influência na vazão volumétrica de ar.

(a) – Diâmetro e pressão da bomba      (b) – Taxa de abrasivo e geometria

Assumindo que a diferença de pressão e a vazão volumétrica de ar expressam as características da bomba. A figura 4.9 ilustra tais relações, comprovando também a equação 4.10.

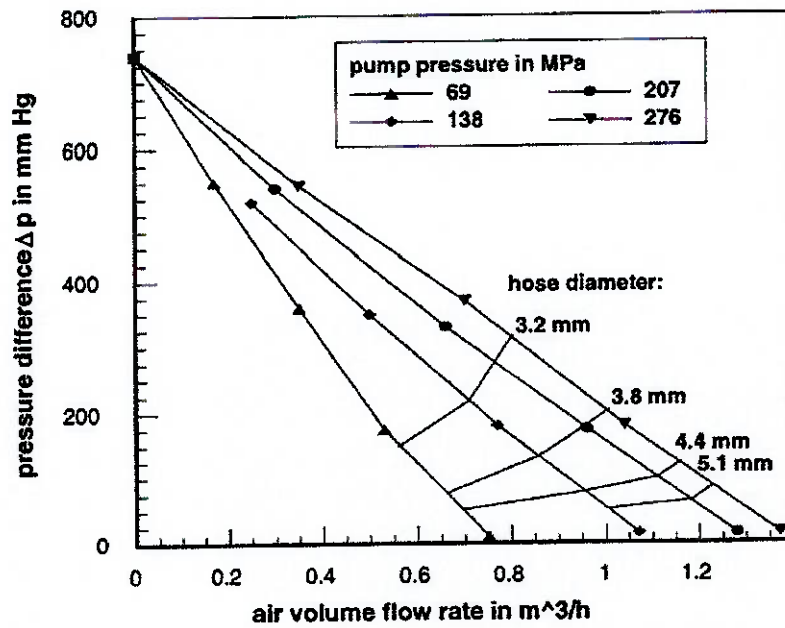


Figura 4.9: Características da bomba para jatos de água de alta velocidade.

#### 4.3.3. Velocidade de entrada da partícula abrasiva

Assumindo que as partículas entram na câmara de mistura com a mesma velocidade do ar, temos que:

$$v_{po} = \frac{v_L}{1 + C^* \left[ \frac{\rho_P}{\rho_L} - 1 \right]^{\frac{2}{3}} \cdot \left[ \frac{d_P}{d_{SH}} \right]^{\frac{2}{3}} \cdot \left[ 1 + \frac{200}{F_R - F_{R0}} \right]} \quad (4.11)$$

Onde  $v_L$  é a velocidade do ar obtida pela equação da continuidade:

$$v_L = \frac{4 \cdot \dot{Q}_L}{\pi \cdot d_{SH}^2} \quad (4.12)$$

e  $F_R$  é o número de Froude, definido por:

$$F_R = \frac{v_L^2}{d_{SH} \cdot g} \quad (4.13)$$

O parâmetro  $C^*$  e  $F_{R0}$  são tabelados. Para partículas de quartzo de diâmetros entre 500  $\mu\text{m}$  e 700  $\mu\text{m}$ ,  $C^*$  é igual a 0,09 e  $F_{R0}$  igual a 100. Para condições gerais, a equação 5.11 pode ser expressa por:

$$v_{p0} = \alpha_4 \cdot \cos \theta_A \frac{4 \cdot \dot{Q}_L}{\pi \cdot d_{SH}^2} \quad (4.14)$$

#### **4.4. Desgaste do bico em sistemas de injeção**

##### **4.4.1. Considerações gerais do desgaste do bico**

As causas mais importantes da inutilização dos bicos são o desgaste (85%) e a quebra (13%). Os critérios aqui apresentados são válidos apenas para bicos de materiais de alta resistência.

Os fenômenos envolvidos no desgaste da peça que serão discutidos são:

- Aumento do diâmetro na saída do bico;
- Perda de massa do bico;
- Mudança na geometria do furo do bico;

##### **4.4.2. Diâmetro de saída do bico**

###### **4.4.2.1. Observações preliminares**

A maneira mais comum de se estimar o desgaste do bico, é através da medição do seu diâmetro de saída durante um determinado período. Foi observado que a razão dos diâmetros  $D_F/d_F(t)$  depende da combinação do seu material e do material abrasivo. Foi constatado que bicos cerâmicos desgastam-se mais rápido que bicos de metal-duro, apesar de possuir uma dureza maior, indicando que o desgaste do bico,

ou sua vida útil, não se comporta de maneira semelhante às relações de dureza entre os materiais.

#### **4.4.2.2. Taxa de desgaste do bico**

O desgaste do bico se relaciona com o tempo de funcionamento de forma linear, chegando na seguinte equação:

$$d_F = W_F \cdot t \quad (4.15)$$

Onde  $W_F$  é a taxa de desgaste do bico, que é função de diversos parâmetros que englobam o material e o processo:

$$W_F = \frac{\Delta d_F}{\Delta t} \quad (4.16)$$

#### **4.4.2.3. Parâmetros de processo**

Podemos citar como parâmetros de processo que influenciam no desgaste do bico a pressão da bomba, o comprimento do bico e o diâmetro médio das partículas abrasivas. A taxa de desgaste do bico se relaciona de forma direta e proporcional à pressão de operação da bomba e o diâmetro médio das partículas abrasivas. As figuras 4.10 e 4.11 mostram tais relações. Já com relação ao comprimento do bico, a taxa de desgaste é inversamente proporcional, conforme mostrado na figura 4.12.

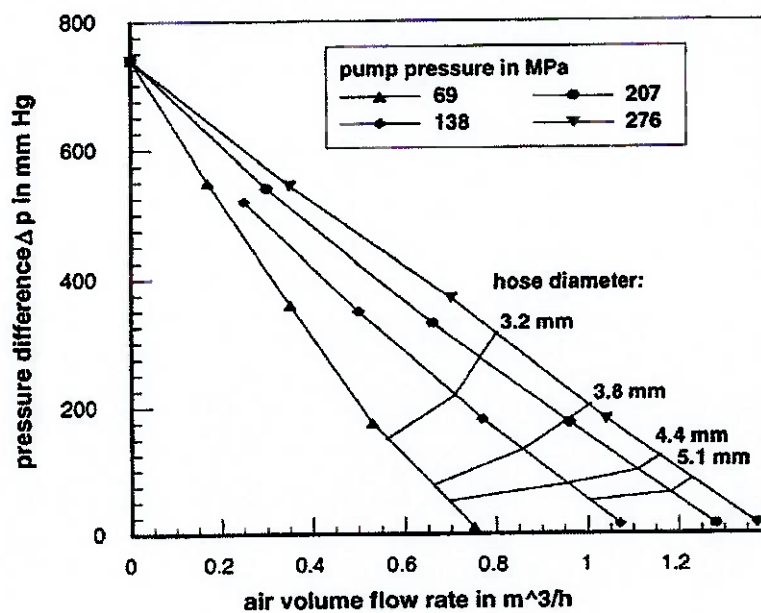


Figura 4.10: Influência da pressão da bomba na taxa de desgaste do bico.

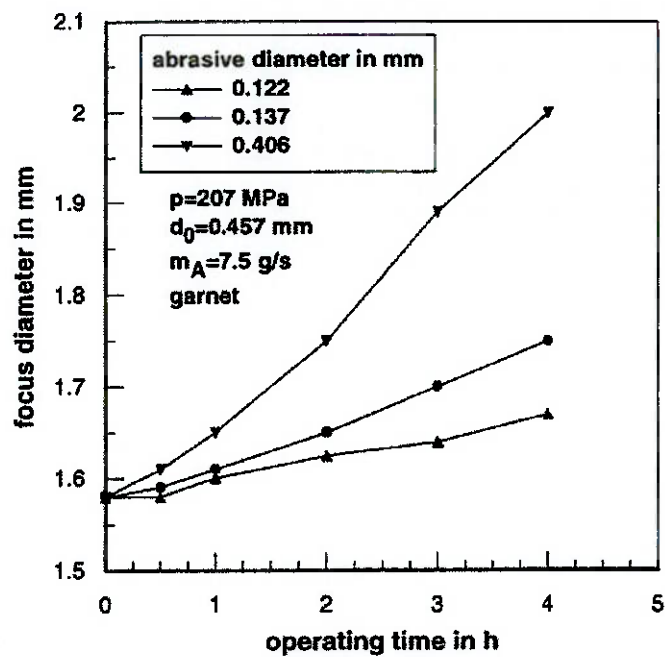


Figura 4.11: Influência do diâmetro médio das partículas abrasivas na taxa de desgaste do bico.



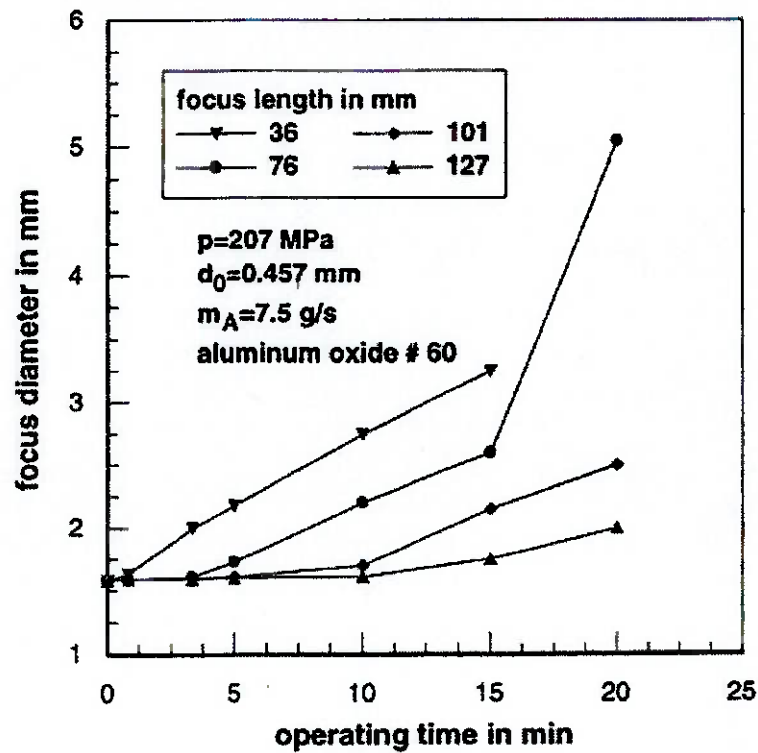


Figura 4.12: Influência do comprimento do bico na taxa de desgaste.

A figura 4.13 mostra a forma que o desgaste do bico ocorre internamente.



Figura 4.13: Fotografia ampliada em corte de um bico após o uso de 6,5 horas.

#### 4.4.2.4. Influência da dureza

A influência das durezas, tanto do material abrasivo, quanto do material do bico pode ser relacionada da seguinte maneira:

$$\log d_F = C_1 \cdot \log\left(\frac{H_P}{H_F}\right) - C_2 \quad (4.17)$$

Onde as durezas dos materiais são em Vickers e as constantes  $C_1$  e  $C_2$ , coeficientes que envolvem outros parâmetros. A validade da equação 4.17 restringe-se a valores da razão  $H_P/H_F$  entre 0.7 e 1.2.

A figura 4.14 ilustra a influência da dureza do material abrasivo e do material do bico na taxa de desgaste.

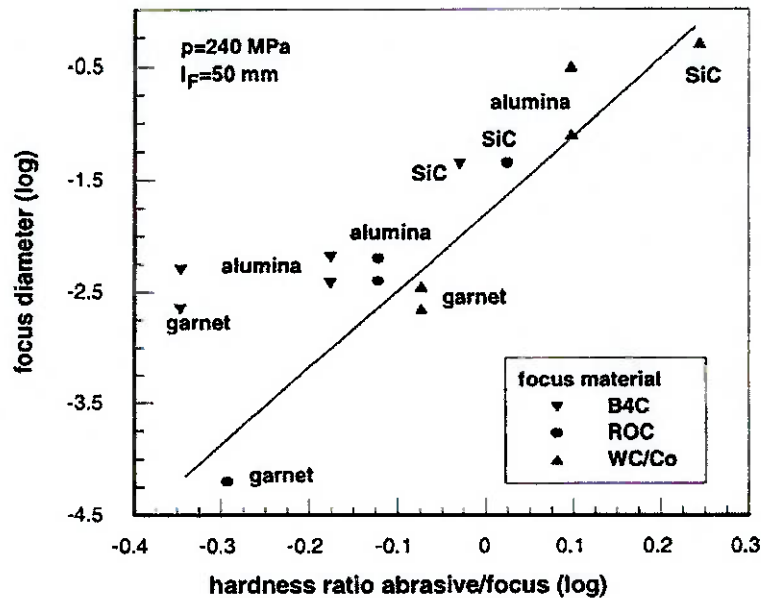


Figura 4.14: Influência da dureza dos materiais do bico e do abrasivo na taxa de desgaste do bico.

#### 4.4.3. Perda de massa do bico

O desgaste do bico não deve se prender apenas a medições do diâmetro de saída do bico, isto porque, apenas este parâmetro não garante uma relação totalmente correta quanto à capacidade de corte do jato formado. A figura 4.15 ilustra um modelo de como o desgaste do bico se realiza; mostrando a formação de ondulações nas paredes

internas, influenciando a capacidade de corte. Assim, uma forma de se analisar esse fenômeno, é através da medição da taxa da perda de massa do bico, e compará-la à profundidade de corte ao decorrer do tempo. As figuras 4.16 a e b, ilustram estas relações.

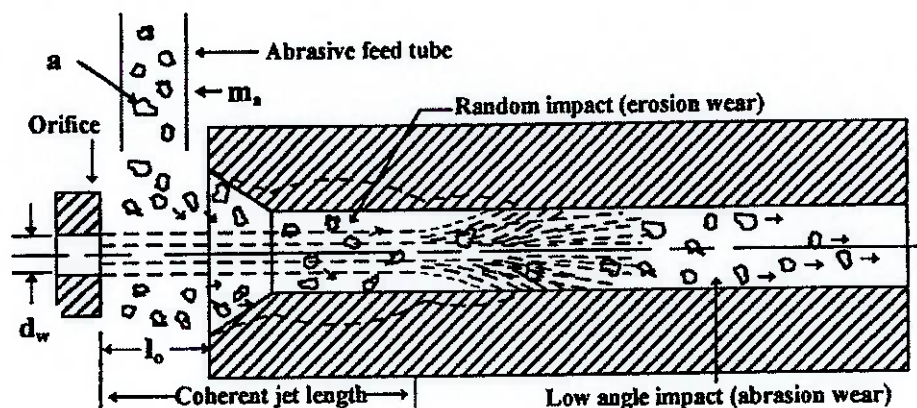


Figura 4.15: Modelo do desgaste do bico.

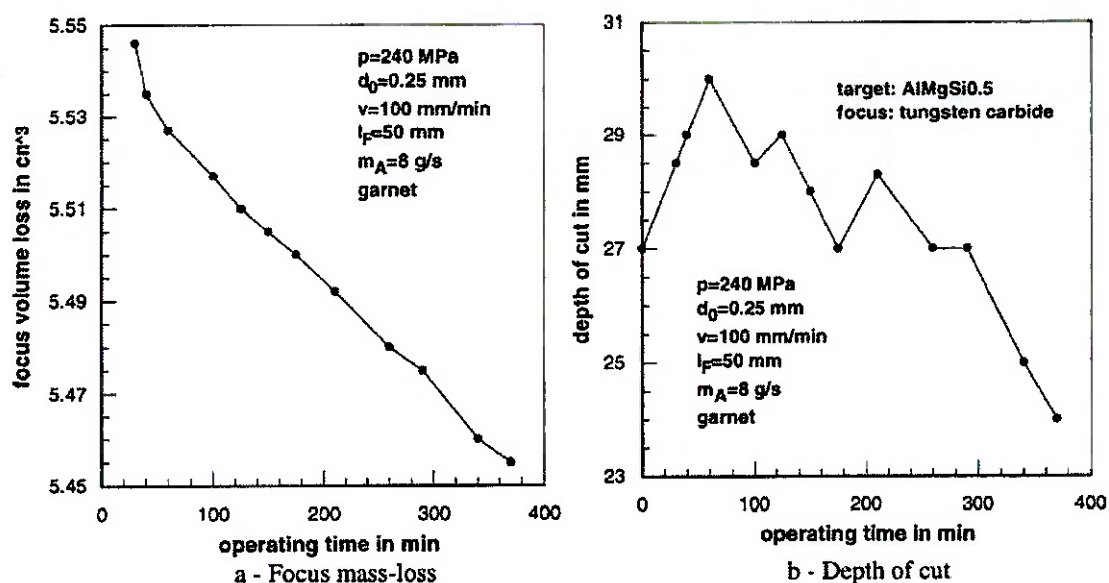


Figura 4.16: Relação do tempo de uso do bico, perda de massa e performance do jato.

#### 4.4.4. Mudança da geometria do furo do bico

Um outro aspecto que deve ser abordado no que diz respeito ao desgaste do furo interno do bico, é a mudança geométrica de seu formato. Passa de um furo circular, e toma a forma elíptica. Esta mudança ocorre principalmente devido ao desalinhamento entre a jóia e o bico, o que reduz sua vida útil em até 40 %.

#### 4.4.5. Estimativa do tempo de vida do bico

A vida útil do bico é função de diversos fatores, conforme já mencionado. Valores típicos para bicos de alta-resistência são de aproximadamente 100hrs, e para bicos de carbeto de tungstênio, 10hrs. A equação apresentada a seguir, relaciona o tempo de vida do bico, em função de diversos parâmetros:

$$t_L = \frac{5,587}{P^{1,215} \cdot m_A^{0,245}} \quad (4.18)$$

Onde  $t_L = t \cdot (1,7 \cdot d_F)$ , em minutos. A pressão da bomba é em MPa e a vazão mássica em g/s. A figura 4.17 representa a curva dada pela equação 4.18.

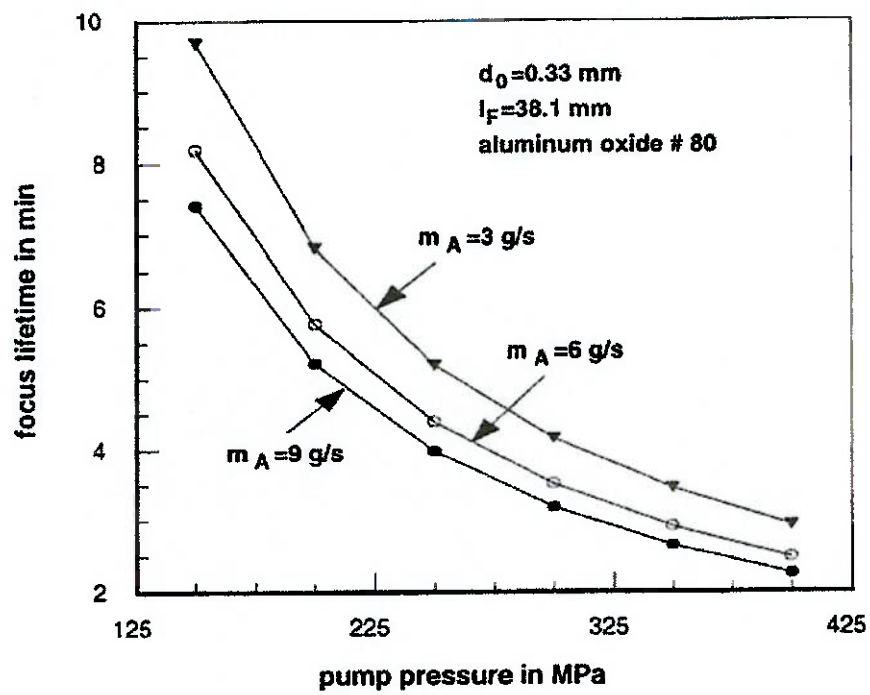


Figura 4.17: Estimação do tempo de vida de bicos.

## 5. PARÂMETROS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROJETO

As descrições dos parâmetros, bem como suas análises e conclusões descritas no presente capítulo, são baseados em estudos elaborados por Momber e Kovacevic (1998).

### 5.1. Definição dos parâmetros

O processo de corte por jato de água abrasivo é caracterizado por diversos parâmetros que determinam sua eficiência, economia e qualidade do corte e do processo como um todo.

Podemos agrupar tais parâmetros, afim de facilitar esse estudo, da seguinte maneira:

- Parâmetros hidráulicos:
  - Pressão da bomba (P);
  - Diâmetro do orifício da jóia ( $d_0$ ).
- Parâmetros de corte:
  - Velocidade transversal (v);
  - Número de passes ( $n_p$ );
  - Distância entre o bico e o material (x);
  - Ângulo de impacto ( $\phi$ ).
- Parâmetros de mistura e aceleração do abrasivo e ar:
  - Diâmetro do bico ( $d_f$ );
  - Comprimento do bico ( $l_f$ ).
- Parâmetros do abrasivo:
  - Vazão mássica de abrasivo ( $\dot{m}_a$ );
  - Diâmetro da partícula abrasiva ( $d_p$ );
  - Formato das partículas abrasivas;
  - Dureza do abrasivo ( $H_p$ ).

A figura 5.1 ilustra os parâmetros acima mencionados em um sistema padrão de máquina de corte por jato de água.

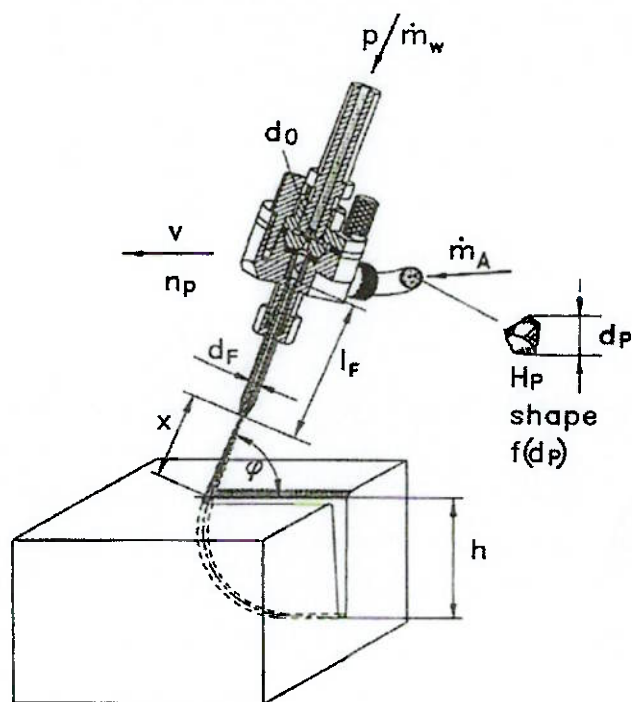


Figura 5.1: Parâmetros de otimização do corte por jato de água.

### 5.1.1. Parâmetros de avaliação

No corte por jato de água, o parâmetro que melhor avalia sua eficiência é a profundidade de corte ( $h$ ), ou a espessura do material a ser usinado ( $h_s$ ). Essas alturas podem ser relacionadas da seguinte maneira:

$$h_s = 0.8 \cdot h \quad (5.1)$$

A figura 5.2 ilustra tal relação:

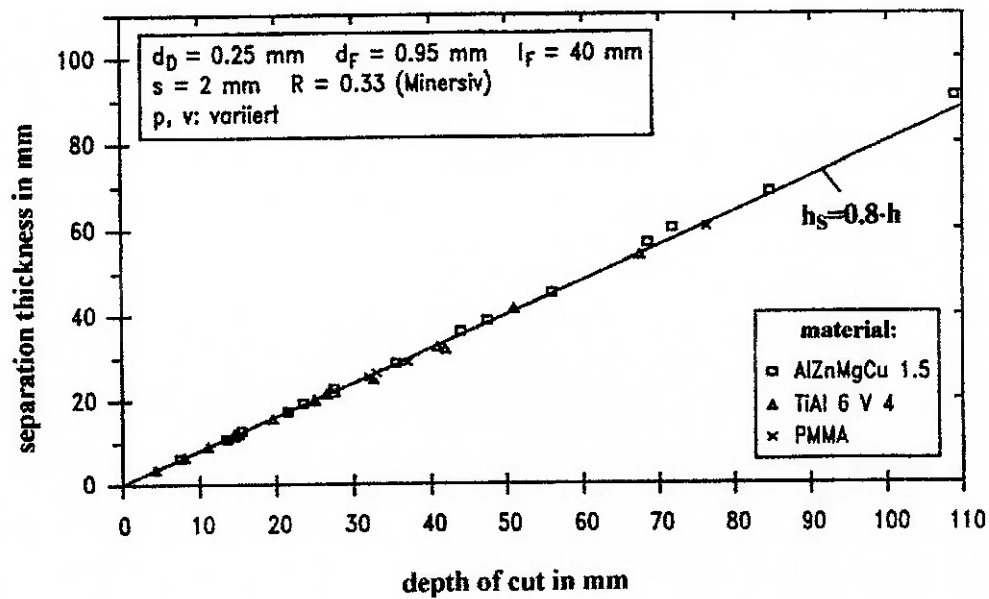


Figura 5.2: Relação entre a profundidade de corte e espessura do material a ser usinado.

Um outro parâmetro que deve ser analisado é a taxa de corte em função da área, que relaciona a velocidade transversal de corte ( $v$ ) e a profundidade:

$$A_h = h \cdot v \quad (5.2)$$

Em processos de usinagem, onde o princípio é baseado na remoção de material, o volume de material removido é dado por:

$$V_M = h \cdot b_h \cdot L_h \quad (5.3)$$

E o parâmetro a ser analisado deve ser a taxa de remoção de material, que relaciona também a velocidade transversal:

$$V_M = h \cdot b_h \cdot v = \frac{V_M}{t_E} \quad (5.4)$$



## 5.2. Parâmetros hidráulicos

### 5.2.1. Pressão da bomba

#### 5.2.1.1. Observações gerais

A pressão da bomba influi em diversos parâmetros que também influem na eficiência do corte. A relação geral entre a pressão da bomba e a profundidade de corte pode ser estimada pela seguinte fórmula:

$$h(P) = C_1 \cdot (P - P_{thr})^{C_2} \quad (5.5)$$

Onde  $C_1 = \frac{\Delta h}{\Delta P}$ ,  $P_{thr}$  é a pressão mínima de corte. Esta expressão acima mencionada é o resultado de relações de diversos parâmetros entre a pressão da bomba e o processo de formação do jato (mistura e aceleração do abrasivo) e da remoção do material. O fato da velocidade do jato provir da energia de pressão, o aumento da pressão resulta em um aumento de velocidade, assim a velocidade do jato de água em função da pressão pode ser dado por:

$$v_0(P) = \sqrt{2} \cdot \mu(P) \cdot \sqrt{\frac{P}{\rho_w(P)}} \quad (5.6)$$

A figura 5.3 mostra as relações de diversos parâmetros, dividindo os materiais de comportamento dúctil e duros.

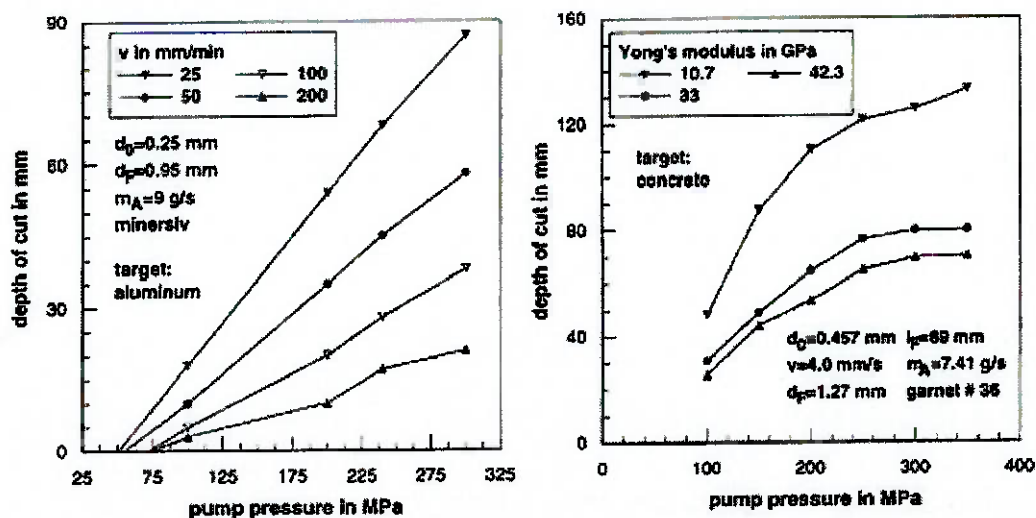


Figura 5.3: Relações entre a pressão da bomba e a profundidade de corte.

Um outro fator sob a influência da pressão da bomba é a vazão mássica de abrasivo. Isto porque, com o aumento de velocidade há um aumento da pressão de sucção formada no interior da câmara de mistura. Assim, a vazão mássica de abrasivo relaciona-se com a velocidade do jato de água (em função da pressão) da seguinte maneira:

$$v_p(P) = \eta_T(P) \cdot \frac{v_0(P)}{1 + \frac{\dot{m}_A(P)}{\dot{m}_W(P)}} \quad (5.7)$$

#### 5.2.1.2. Pressão mínima de corte

A pressão mínima de corte é a condição mínima para que haja remoção de material significativa. É função de diversos parâmetros, dentre os quais, devemos ressaltar a vazão mássica de abrasivo, o diâmetro do orifício, a velocidade transversal e o comprimento do bico. Estas relações são ilustradas na figura 5.4.

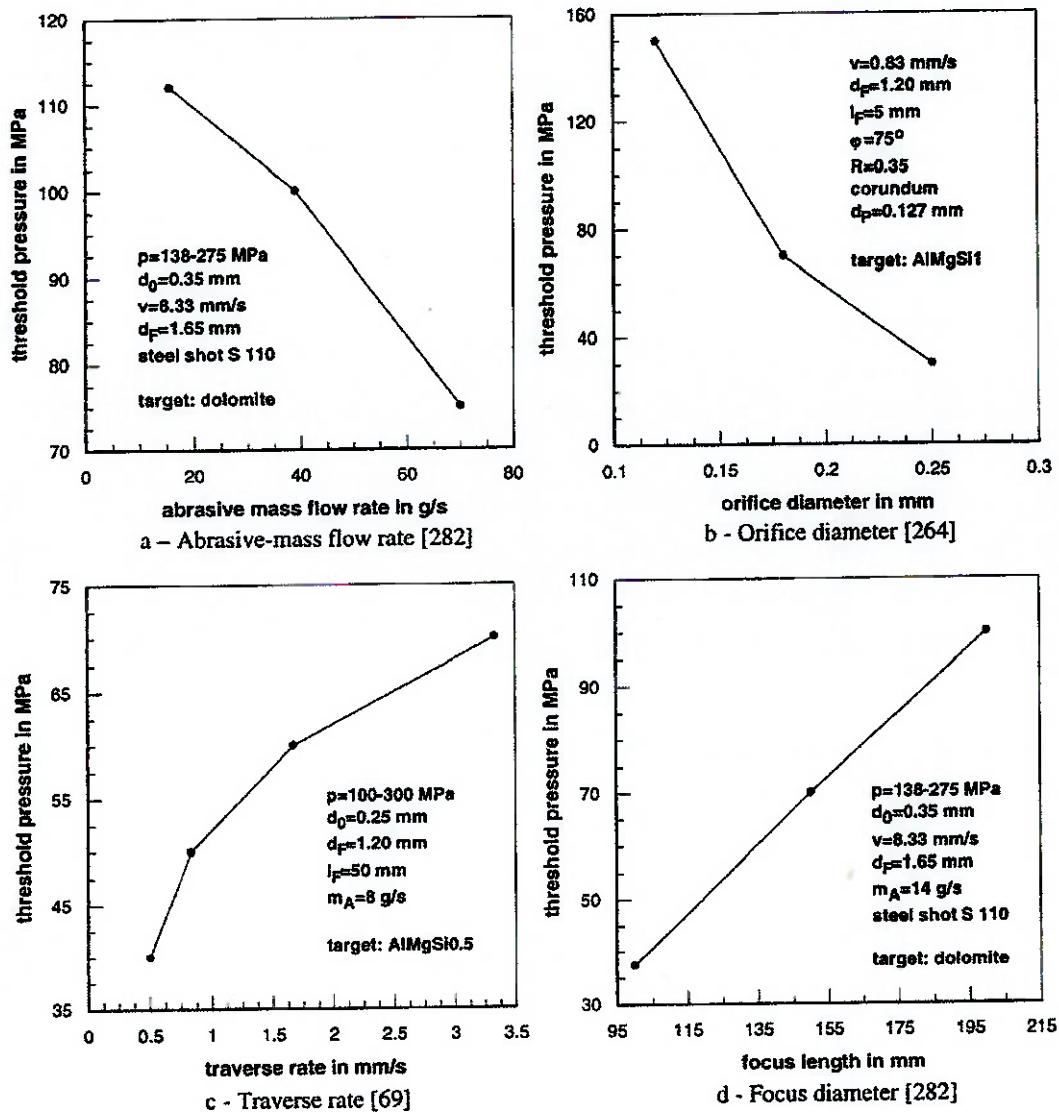


Figura 5.4: Pressão mínima de corte em função de diversos parâmetros.

### 5.2.1.3. Aspectos de otimização

Como pudemos observar, a pressão mínima de corte é de fundamental importância, devendo ser tomada como base para a definição da pressão ótima da bomba. Através do equacionamento do balanço de energia, obtemos a seguinte relação entre ambas:

$$P_{opt}=3.P_{thr}.$$

## 5.2.2. Diâmetro do orifício da jóia

### 5.2.2.1. Considerações gerais

A influência do diâmetro do orifício da jóia no processo de remoção de material é devido à sua influência na vazão da água, e, conseqüentemente, da transferência de seu momento. Assim, a capacidade de transferência de momento e a velocidade das partículas abrasivas aumentam com o aumento do orifício. Porém, por um outro lado, devemos ressaltar que um aumento na vazão mássica de água e abrasivo, requer um aumento de energia. Assim, este parâmetro deve ser analisado não apenas sob o critério de profundidade de corte, mas também, através da energia específica de corte. A figura 5.5 ilustra tais relações:

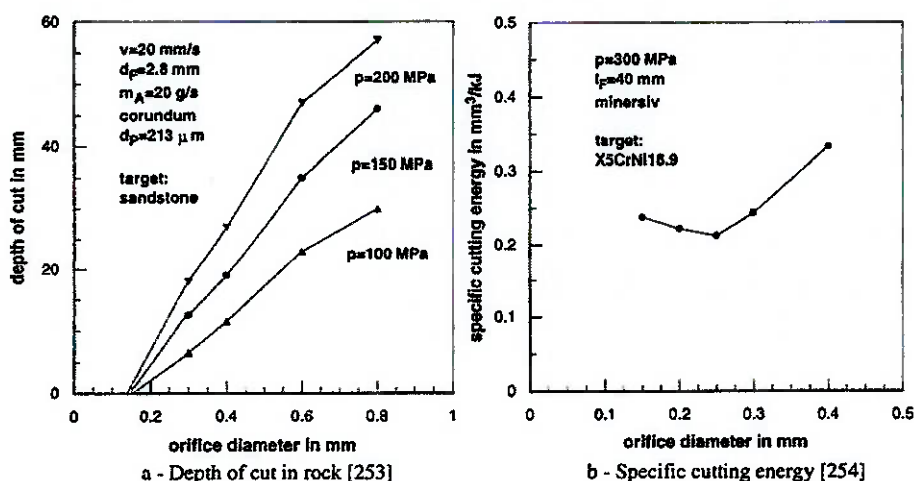


Figura 5.5: Relação entre o diâmetro do orifício da jóia e (a) profundidade de corte, (b) energia específica de corte.

### 5.2.2.2. Aspectos para otimização

Para uma determinada vazão mássica de água, existe um ótimo diâmetro do orifício da jóia. Da figura 5.4b podemos adotar um diâmetro ótimo de aproximadamente 0,25mm, já que apresenta a menor energia específica de corte. Devemos ressaltar que qualquer alteração do diâmetro do orifício, faz-se necessária uma nova calibração de abrasivo e água para torná-lo “ótimo”.

Sob o ponto de vista de consumo de água, o diâmetro otimizado seria de tamanhos médios, já que a área de corte por volume de água decresce com o aumento do diâmetro.

### 5.3. Parâmetros de corte

#### 5.3.1. Velocidade transversal

##### 5.3.1.1. Considerações gerais

A influência da velocidade transversal na profundidade de corte apresenta grande significância para baixas velocidades, e conforme aumenta, esta influência torna-se menos significativa, até velocidades transversais cujas profundidade de corte aproximam-se de zero. A equação matemática que rege esta relação (exponencial) é:

$$h(v) = C_7 \cdot v^{C_8} \quad (5.8)$$

Na equação acima apresentada,  $C_8$  é um número negativo entre -0,4 e -1,0. A constante  $C_7$  leva em consideração a influência de outros parâmetros. A figura 5.6 ilustra esta relação:

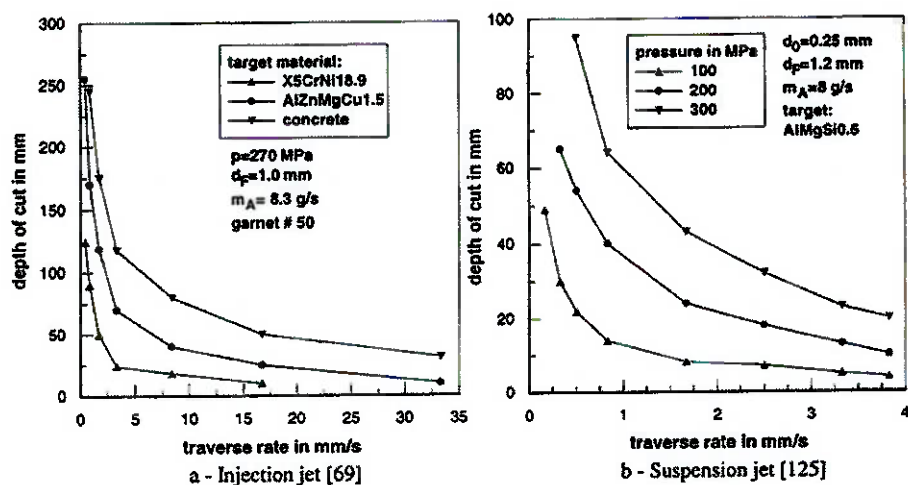


Figura 5.6: Relação entre a velocidade transversal e a profundidade de corte.

### 5.3.1.2. Tempo de exposição

A grande influência da velocidade transversal se deve ao tempo de exposição à qual o material é submetido ao jato de água. Assim, o tempo de corte é inversamente proporcional à velocidade transversal:

$$t = \frac{1}{v} \cdot \int_0^x dx = \frac{x}{v} \quad (5.9)$$

Dessa forma, a energia envolvida no processo é também inversamente proporcional à velocidade transversal.

### 5.3.1.3. Aspectos para otimização

Para uma determinada vazão mássica de abrasivo, um aumento na velocidade implica na diminuição da capacidade de corte do jato. Para a otimização da velocidade, deve-se levar em conta, principalmente a espessura do material a ser usinado, bem como o acabamento desejado e o consumo de energia, água e abrasivo.

## 5.3.2. Número de passes

### 5.3.2.1. Observações gerais

O conceito da utilização de passes múltiplos no processo de corte por jato de água é de aumentar o tempo de exposição da peça sob o jato de água. Como visto anteriormente, o tempo de exposição relaciona-se de forma direta e proporcional à capacidade de corte para tempos relativamente pequenos, diminuindo sua eficiência para tempos de exposição maiores, isto é, devido às forças de atrito entre as próprias partículas de abrasivo, o que não ocorre no caso de múltiplos passes. A figura 5.6 ilustra a relação entre tempo de exposição e a profundidade de corte, e a figura 5.7, o número de passes e a profundidade de corte.

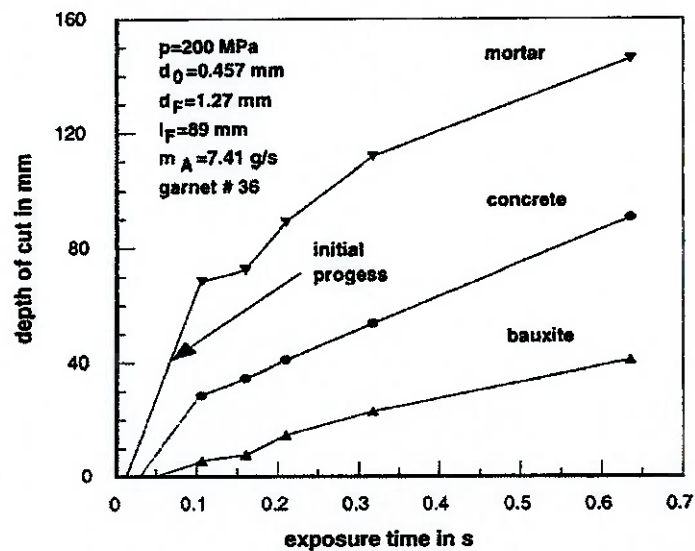


Figura 5.7: Relação entre o tempo de exposição e a profundidade de corte.

Na figura 5.8 pode-se observar o comportamento linear para um número de passes pequenos, tendo sua eficiência reduzida devido ao atrito entre as paredes do material (já previamente cortado) e o jato abrasivo. A dissipação de energia pode ser determinada através da diferença da suposta linha ideal e da linha real.

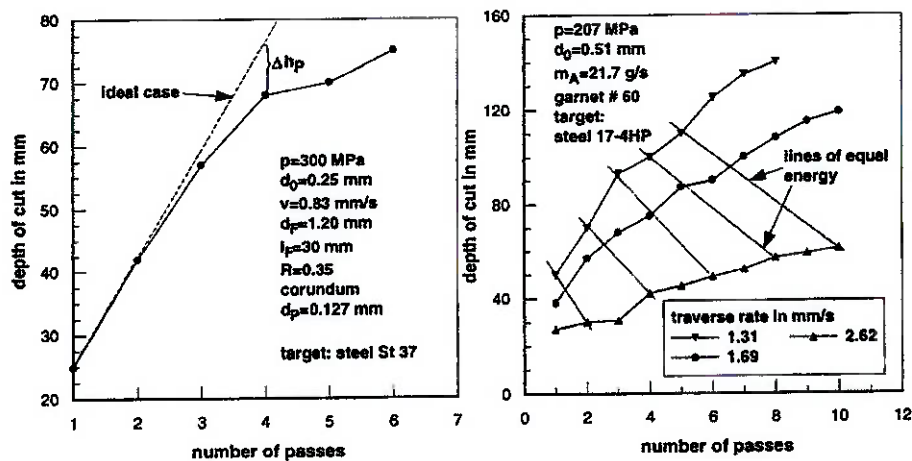


Figura 5.8: Relação entre o número de passes e a profundidade de corte.

### 5.3.2.2. Aspectos para otimização

A otimização do número de passes é baseada no tempo de corte, e, conseqüentemente, na velocidade ótima de corte:

$$v_{opt} = \frac{L_h}{t_{opt}} \quad (5.10)$$

Assim, o número de passes ótimo é dado por:

$$n_{opt} = \frac{t}{t_{opt}} = \frac{v_{opt}}{v} \quad (5.11)$$

### 5.3.3. Distância do bico de corte e do material

#### 5.3.3.1. Observações gerais

A profundidade de corte varia de forma praticamente linear com a variação do bico de corte, com o aumento da distância, a profundidade de corte diminui. A função matemática que representa esta relação, ilustrada pela figura 5.8, é dada por:

$$h(x) = C_{12} \cdot x^{C^{13}} \quad (5.12)$$

Onde  $C^{13}$  é um valor negativo.



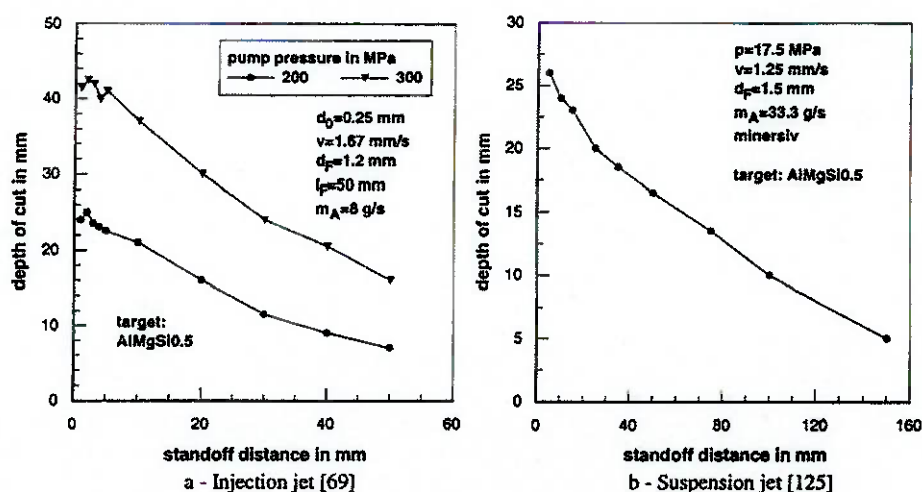


Figura 5.9: Relação entre a profundidade de corte e a distância do bico e do material.

### 5.3.3.2. Aspectos de otimização

Conforme mostrado na figura 5.9, a distância ótima para o bico de corte é a mínima possível. Porém para distâncias muito pequenas (2 mm), esta condição não foi constatada, isto porque, em distâncias muito pequenas, há um refluxo de água para dentro do bico, gerando ineficiência no corte. Assim, distâncias ótimas iniciam-se a partir de 2 mm.

### 5.3.4. Ângulo de impacto

Estudos preliminares a respeito da influência do ângulo de impacto constataram um ângulo ótimo de 90°. Porém, com a otimização da distância entre o bico de corte e o material, foi constatado um refluxo devido à proximidade. Momber; Kovacevic (1998) determinaram ângulos ótimos para materiais de diferentes características (duros e dúcteis), conforme mostra a figura 5.10:

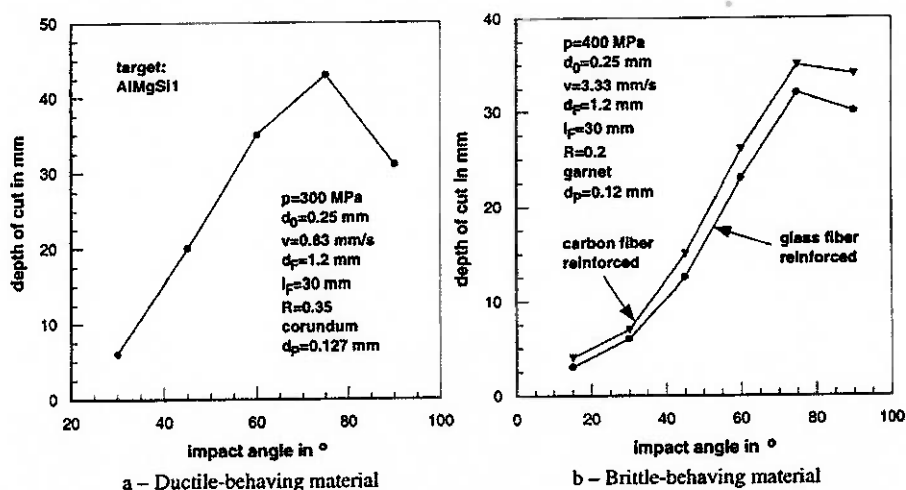


Figura 5.10: Relação entre a profundidade de corte e o ângulo de impacto.

## 5.4. Parâmetros de mistura

### 5.4.1. Diâmetro do bico

#### 5.4.1.1. Observações gerais

Existem duas tendências para a relação entre o diâmetro do bico e a profundidade do corte. Conforme o diâmetro do bico diminui, o atrito entre as paredes e as partículas de abrasivo aumenta, reduzindo assim, sua aceleração e dificultando o processo de mistura, reduzindo a capacidade de corte. Por outro lado, o aumento do diâmetro do bico faz com que a vazão mássica de abrasivo e de ar aumentem na câmara de mistura, o que abaixa a densidade do fluido, reduzindo também a capacidade de corte do jato. A figura 5.11 ilustra tais comportamentos:

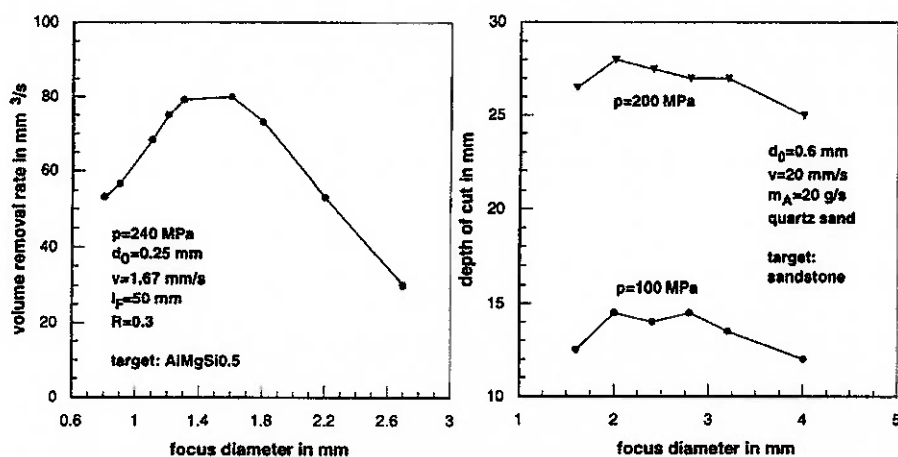


Figura 5.11: Relação do diâmetro do bico e a profundidade de corte.

#### 5.4.1.2. Aspectos para otimização

Um fator de extrema relevância na determinação do diâmetro do bico de corte é o tamanho das partículas abrasivas. Assim, o diâmetro otimizado do bico deve ser de três a quatro vezes o diâmetro da partícula.

### 5.4.2. Comprimento do bico

#### 5.4.2.1. Observações gerais

O comprimento do bico influi diretamente sobre a aceleração das partículas abrasivas, que por sua vez é determinante na performance do jato. Conforme visto anteriormente, é necessário um “espaço” para que haja tempo suficiente para que as partículas de abrasivo assumam a mesma velocidade do jato de água, assim, a aceleração das partículas é maior, quanto maior o comprimento do bico. É claro que este não deve ultrapassar seu comprimento crítico, onde as partículas já atingiram a velocidade do jato, e um maior comprimento apenas acarretará em desaceleração, devido às forças de atrito. A figura 5.12 ilustra a maneira como o comprimento do bico influi na profundidade de corte.

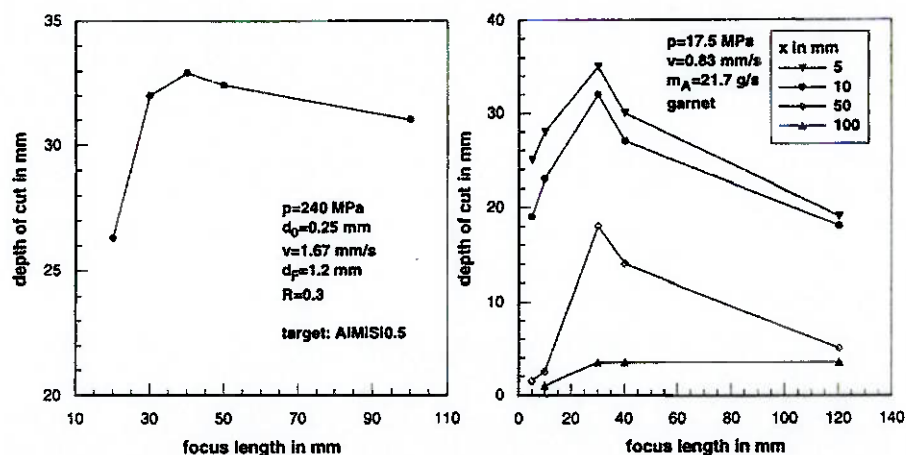


Figura 5.12: Relação entre a profundidade de corte e o comprimento do bico.

#### 5.4.2.2. Aspectos para parâmetro

O comprimento do bico deve ter seu comprimento otimizado baseado em outros parâmetros que também influem na aceleração das partículas abrasivas, estes parâmetros são a pressão da bomba, onde o comprimento ótimo deve aumentar conforme a pressão de operação aumenta, e a densidade do abrasivo, que é relacionado de acordo com a figura 5.13. Os estudos aqui mostrados, sugerem que o comprimento do bico deve ser de vinte e cinco a cinquenta vezes o diâmetro da partícula de abrasivo:

$$l_{\text{Fopt}} = (25 \dots 50) d_F \quad (5.13)$$

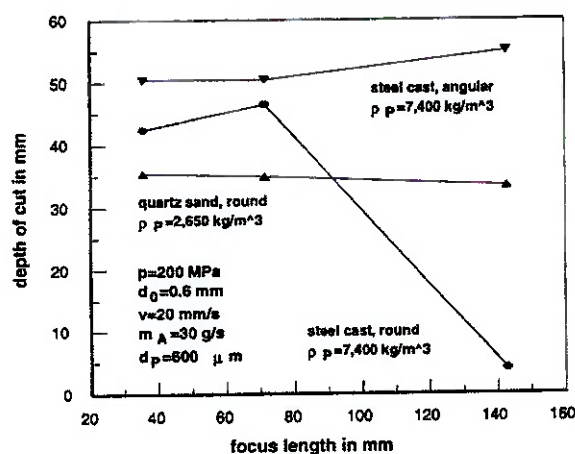


Figura 5.13: Otimização do comprimento do bico.

## 5.5. Parâmetros do abrasivo

### 5.5.1. Vazão mássica do abrasivo

#### 5.5.1.1. Observações gerais

A vazão mássica de abrasivo determina a quantidade de partículas abrasivas que se chocarão com o material, e conseqüentemente o removerão. Assim, quanto maior for a vazão mássica de abrasivo, maior o número de partículas e maior a energia cinética envolvida no processo, resultando numa maior capacidade de corte do jato. A relação entre a vazão mássica de abrasivo e aprofundidade de corte é dada pela seguinte equação, obtida através da equação da energia cinética:

$$h(m) = k \cdot \dot{m}_A^m \quad (5.14)$$

Onde o coeficiente  $m$  é função da vazão mássica. Para pequenas vazões,  $m=1$ , decrescendo à medida que a vazão aumenta. Para a razão otimizada,  $m$  se torna um número negativo (vazões mássicas altas). Sob o ponto de vista do consumo de abrasivo, seus estudos demonstraram que a vazão ótima é para  $m=1$ . A figura 5.14 ilustra a equação 5.14, relacionando a vazão mássica de abrasivo com a profundidade de corte.

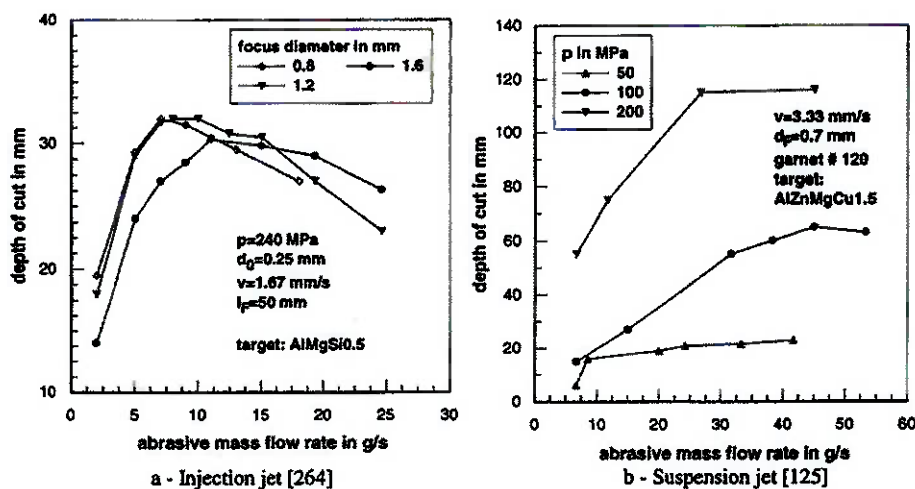


Figura 5.14: Relação entre a vazão mássica de abrasivo e a profundidade de corte.

### 5.5.1.2. Aspectos de otimização

Conforme visto anteriormente, os parâmetros até aqui citados possuem um alto grau de correlação, dessa forma, para otimizarmos a vazão mássica de abrasivos, devemos levá-los em consideração. A figura 5.15 ilustra a relação de alguns desses parâmetros na otimização da vazão mássica de abrasivo.

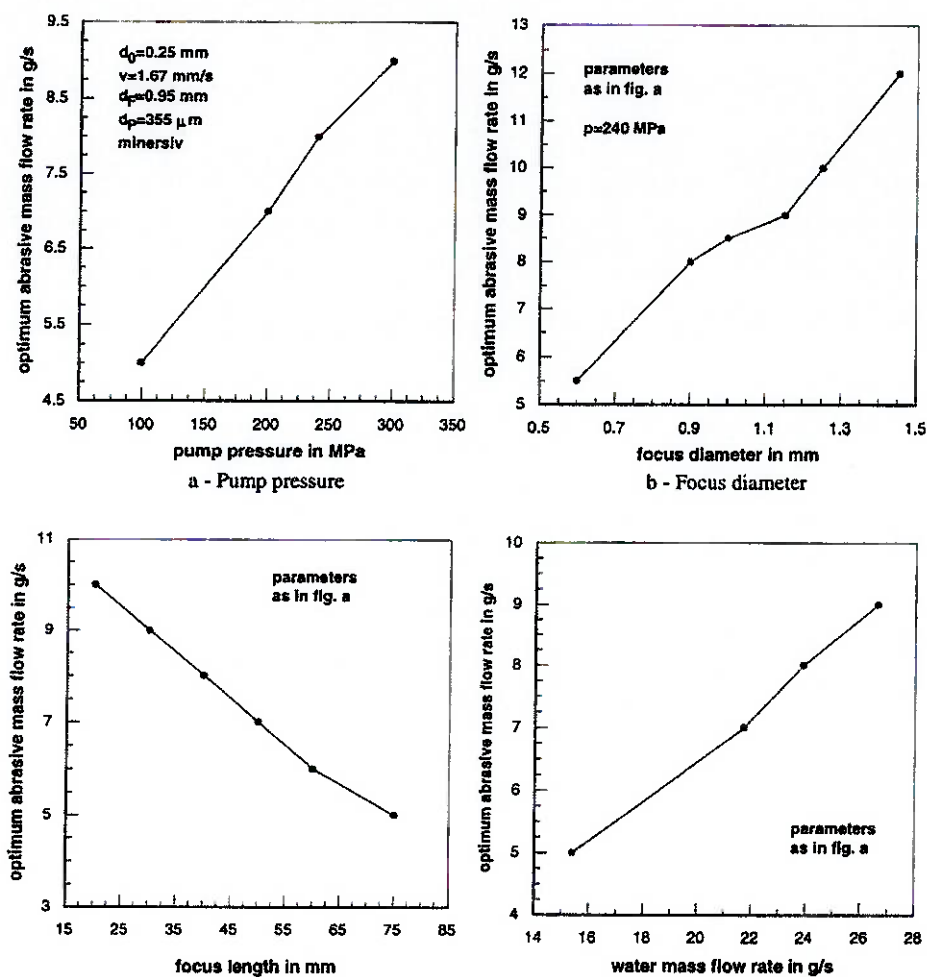


Figura 5.15: Influência de diversos parâmetros na otimização da vazão de abrasivo.

## 5.5.2. Diâmetro da partícula abrasiva

### 5.5.2.1. Observações gerais

O tamanho das partículas abrasivas influi na capacidade de corte de duas maneiras principais: pela sua energia cinética e pela frequência de impacto. Quanto maior for o diâmetro da partícula, maior será a sua massa e, conseqüentemente, sua energia cinética. Por um outro lado, quanto menor for o diâmetro das partículas, para uma mesma vazão mássica, haverá mais partículas e, assim, a frequência de impacto será maior. Desta maneira, poderemos identificar o diâmetro da partícula abrasiva ótimo no ápice da curva gerada de acordo com esses dois parâmetros. A figura 5.16 ilustra essas relações.

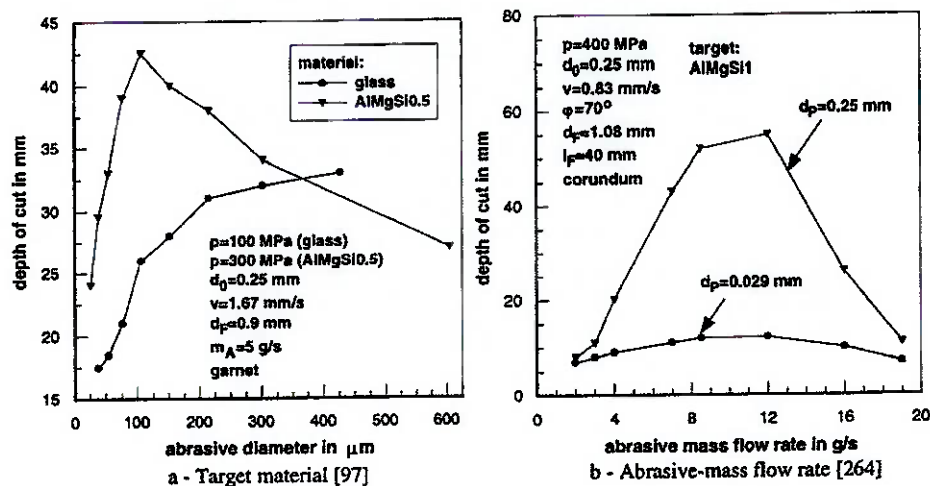


Figura 5.16: Relação entre diâmetro da partícula e profundidade de corte.

### 5.5.2.2. Aspectos para otimização

Na otimização do diâmetro da partícula de abrasivo, deve ser ressaltada a importância da velocidade transversal, principalmente para diâmetros maiores. Isto porque, com a redução de partículas existentes, para grandes velocidades, este número se reduz ainda mais, agravando o aspecto já abordado de frequência de

impacto. Outro fator importante na seleção do melhor diâmetro é a vazão mássica do abrasivo, bem como o formato do grão.

### 5.5.2.3. Formato da partícula abrasiva

As partículas de abrasivo tendem a tomar duas formas: uma se aproximando de pequenas esferas, e outra apresentando cantos vivos e pontas. A figura 5.17 compara o resultado entre estes dois tipos de formatos do abrasivo. Devemos observar que o formato da partícula não influi significativamente na vazão mássica ótima, apenas melhora a eficiência (profundidade) do corte.

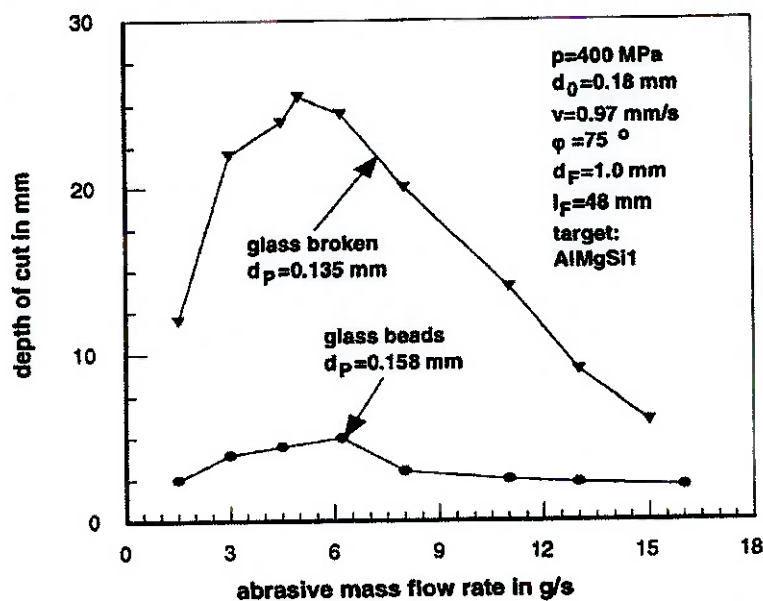


Figura 5.17: Relação entre o formato da partícula e a profundidade de corte.

### 5.5.3. Dureza do abrasivo

A remoção de material pelo método do jato de água abrasivo é feita através do choque das partículas abrasivas contra o material a ser usinado. Assim, é intuitivo que a dureza do abrasivo influi de maneira proporcional na profundidade de corte. A figura 5.18 ilustra essa relação.



Devemos ressaltar que, para efeito de otimização da máquina como um todo, a escolha de abrasivos com durezas muito elevadas reduzem significativamente o tempo de vida do bico de corte, fazendo-se necessária uma análise conjunta. Outro fator que deve ser considerado é o custo de tais abrasivos, devido ao seu grande consumo.

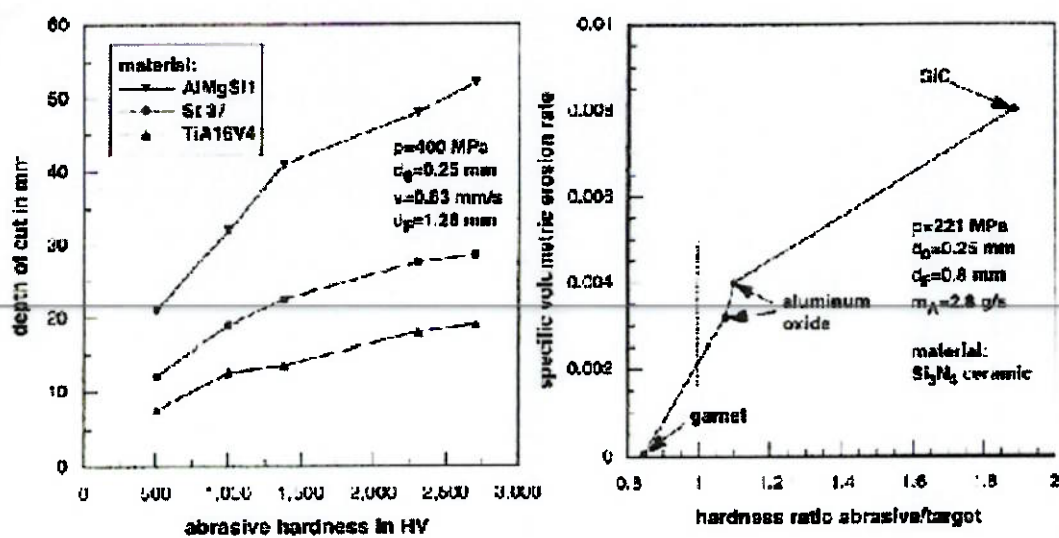


Figura 5.18: Influência da dureza do material abrasivo na eficiência do jato de água.

## 6. TECNOLOGIAS ALTERNATIVAS

O estudo de tecnologias alternativas tem como principal foco estudar métodos de geração de jatos com potencial de corte igual ou superior ao jato abrasivo, visando assim, a redução na pressão de operação, o que reduziria significativamente o custo de uma máquina de corte por jato de água, bem como aumentaria sua capacidade, eficiência e economia.

### 6.1. Jato Pulsante ou Modulado

Segundo Mazurkiewicz (1983), o impacto do jato num ponto do material, ou seja, quando um jato de água contínuo constante incide normalmente numa superfície a ser cortada qualquer, a pressão máxima no ponto de impacto é chamada de pressão de estagnação  $p_s$ , que é dada por:

$$P_s = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_0^2 \quad (6.1)$$

Onde:  $V_0$  = velocidade do jato;

$\rho$  = densidade da água.

$V_0$  é proporcional a  $P$ , pressão estática na entrada do bico (pressão da bomba) – (perdas por atrito). Entretanto, se uma gota ou uma fração de água atingem a mesma superfície, a pressão de impacto inicial será muito maior. Esta é a pressão *water hammer* que é dada por:

$$P_i = \rho \cdot V_0 \cdot C_0 \quad (6.2)$$

Onde:  $C_0$  = velocidade do som na água = 1524 m/s.

O tempo de duração em que a pressão *water hammer* age, de acordo com Vijay em VLN Advanced Technologies Inc. (2005), é:

$$t_i = \frac{d}{2 \cdot C_0} \quad (6.3)$$

Onde: d = diâmetro do bico.

Da combinação das duas equações anteriores, obtém-se a amplificação da pressão na superfície que é dada por:

$$M = \frac{P_i}{P_s} = \frac{2 \cdot C_0}{V_0} \quad (6.4)$$

Exemplos de possíveis resultados:

<b>ps (psi)</b>	5,000	7,500	10,000	12,500	15,000	17,500	20,000
<b>BAR</b>	350 bar	500 bar	700 bar	860 bar	1,030 bar	1,200 bar	1,380 bar
<b>(MPa)</b>	34.5	52.2	69.0	86.2	103.5	121.0	138.0
<b>M</b>	11.6	9.5	8.2	7.3	6.7	6.2	5.8

Tabela 6.1: Possíveis resultados obtidos pelo efeito *water hammer* [5].

Para este exemplo, quando uma bomba é configurada para operar a uma pressão de 69 MPa, a pressão *water hammer* no alvo seria de 566 MPa (82000 psi). Como o comportamento do material depende da pressão de impacto e tempo (determinado pela frequência e diâmetro do bico), melhorias significativas na performance do corte podem ser esperadas com o uso de jato de água pulsante.

Considerando as equações 6.1 e 6.2, a duração da pressão de pico pode ser estimada da seguinte maneira também:

$$t_i = \frac{2 \cdot l}{C_0} \quad (6.5)$$

Onde:  $l$  = comprimento do segmento do jato;

$C_0$  = velocidade do som na água = 1524 m/s.

Porém, para uma faixa de taxas de velocidades de impacto altas, a equação convencional de *water hammer* que foi originalmente proposta por Saint Venant deve ser corrigida para permitir a compressibilidade do líquido.

Huang e Hammit apud Mazurkiewicz (1983) descobriram que a equação corrigida abaixo tem menos de 3% de erro sobre uma faixa de taxas de velocidades de impacto .

$$\frac{v}{C_0} \leq 3. \quad (6.6)$$

$$\frac{C}{C_0} = 1 + 2 \cdot \left( \frac{v}{C_0} \right) - 0.1 \cdot \left( \frac{v}{C_0} \right)^2 \quad (6.7)$$

Após este nível, a pressão *water hammer* será de:

$$p_{wh} = \rho_0 \cdot C \cdot v \quad (6.8)$$

Onde:  $C$  = velocidade de onda de choque do líquido.

Comparando a pressão efetiva na superfície alvo desenvolvida por um jato descontínuo (pressão de estagnação) com a pressão imposta pela fração do jato cilíndrico (“pressão *water hammer*”) pode-se notar que uma vantagem significativa pode ser obtida através do corte com frações discretas de jato ao invés do jato contínuo.

O resultado desses cálculos são mostrados na figura 6.1. É claro que a pressão de estagnação desenvolvida pelo jato movendo-se a 500 m/s é de cerca de 9% da pressão desenvolvida pelo impacto da ponta do segmento do jato cilíndrico. Em outras palavras, o nível da pressão *water hammer* só poderia ser alcançado por um jato contínuo se a pressão da bomba for aumentada em cerca de 11 vezes,

necessitando de um aumento de potência de cerca de 37 vezes. É possível prever que essa saída seria muito cara e com diversos problemas técnicos a serem enfrentados. Uma maneira mais econômica é encontrar uma solução que envolva um interruptor de jato que quebraria um jato em segmentos discretos um após o outro e cada um desenvolvendo um nível de pressão *water hammer* no alvo. A frequência de impacto deve ser alta o suficiente para manter a pequena variação de amplitude de modo a manter esse nível de pressão.

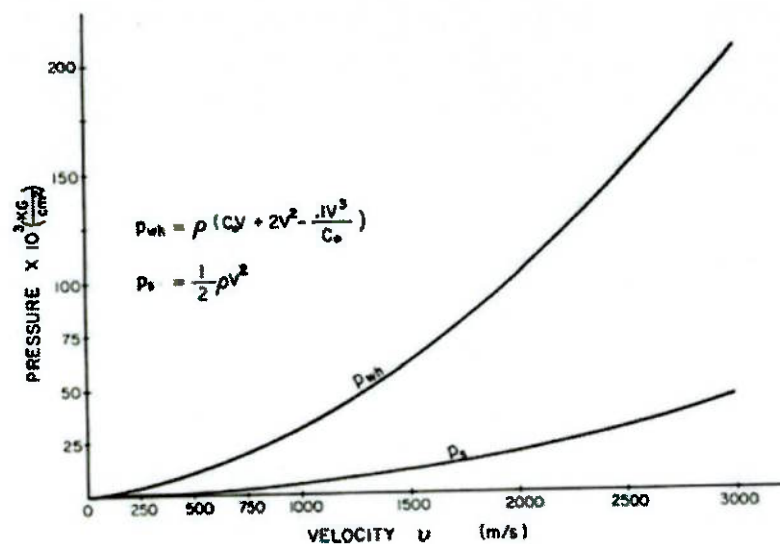


Figura 6.1: Pressão *water hammer* ( $p_{wh}$ ) e pressão de estagnação ( $p_s$ ) versus velocidades [4].

De um ponto de vista técnico, obter um jato modulado é uma grande dificuldade por causa da alta velocidade do jato e da habilidade de corte agressiva do jato. Diversos autores tentaram desenvolver uma solução para este problema (Tabela 6.2). Qualquer uma das soluções propostas produziram uma interrupção no jato, mas a qualidade da fração de jato produzida, de um ponto de vista geométrico, não é alta o suficiente para criar um efeito *water hammer*. Além disso, é muito complicado obter um jato discretamente segmentado de verdade pelo método 2 e 3 antes do jato atingir a amostra. A razão é que a velocidade flutuante do jato não é alta o suficiente para formar uma separação clara do jato. De modo a desenvolver um nível de pressão *water hammer*, a quebra entre os segmentos deve ser longa o suficiente para permitir

que um segmento atinja a superfície e depois deixe-a antes do impacto do segmento seguinte.

O método usado por Summers e Lichtarowicz apud Mazurkiewicz (1983) em que o disco giratório com furos, corta o jato, criará espirro e desvio do jato. O maior problema, entretanto, é o rápido desgaste da lâmina interruptora e alta frequência do ruído gerado.

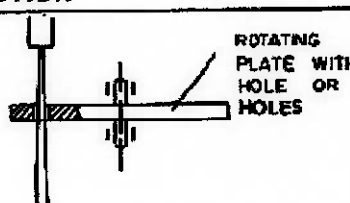
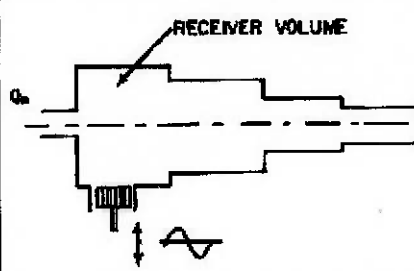
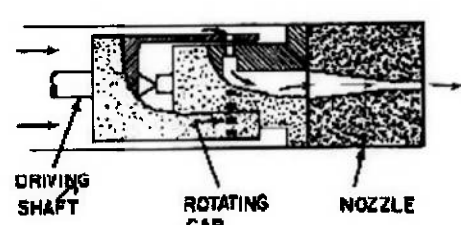
	SOLUTION	AUTHOR
1	 <p>ROTATING PLATE WITH HOLE OR HOLES</p>	A. LICHTAROWICZ G. NWACHUKWA (2) D. A. SUMMERS
2	 <p>RECEIVER VOLUME</p>	E. B. WYLIE (3)
3	 <p>DRIVING SHAFT  ROTATING CAP  NOZZLE</p>	E. B. NEBECKER S. E. RODRIGUEZ (4)

Tabela 6.2: Interruptores de Jatos de Água [4].

Segundo Vijay em VLN Advanced Technologies Inc. (2005), os jatos de água pulsantes podem ser divididos em natural e forçado e existem diversas técnicas para se produzir estes tipos de jato.

Existem diversas vantagens dos jatos pulsantes em relação aos jatos de água contínuos:

- Tensão de impacto maiores, devido à pressão do *water hammer*, que melhora a intensidade da erosão no local e será explicada mais adiante;
- Velocidade de fluxo de saída maior através da superfície de corte, permitindo a abertura de falhas e rachaduras no material;
- Maior taxa de área de impacto por volume de água jorrada, expondo maiores áreas da superfície à pressão do *water hammer*;
- Carregamento cíclico; isto promove tensão de descarregamento que podem aumentar o processo de quebra de ligação da substância do substrato, ou fratura do material a ser cortado;
- Cargas de curta duração, que tendem a minimizar a perda de energia no material a ser cortado, e, ainda, aumentar o material removido por energia de entrada.

#### **6.1.1. Jato de água pulsante natural**

O jato de água pulsante natural é considerado o jato de água que se quebra em gotas, devido ao arrasto aerodinâmico, a uma determinada distância do bico após emergir no ar. Ele é utilizado para algumas simples aplicações industriais de limpeza, pois não são indicados para corte ou para a remoção de revestimentos duros.

## 6.1.2. Jato de água pulsante forçado

### 6.1.2.1. Ultra-sônico

Em mecanismos de quebra forçada, ou seja, com modulação, ondas ultrasônicas são utilizadas para modular um fluxo contínuo de água para gerar jatos de água pulsantes. Os métodos utilizados, o mecanismo de formação, a aparência típica de um jato pulsante estão mostradas nas figuras 6.2, 6.3 e 6.4, respectivamente.

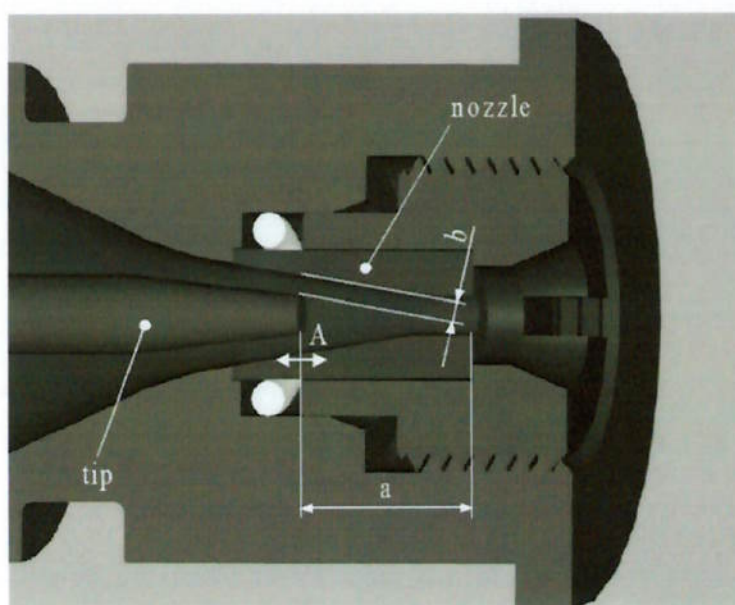


Figura 6.2: Configuração geométrica de um bico ultrasônico [5].

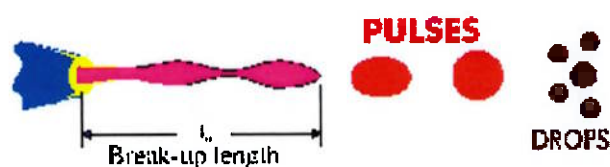


Figura 6.3: Mecanismo de formação de um jato de água pulsante [5].



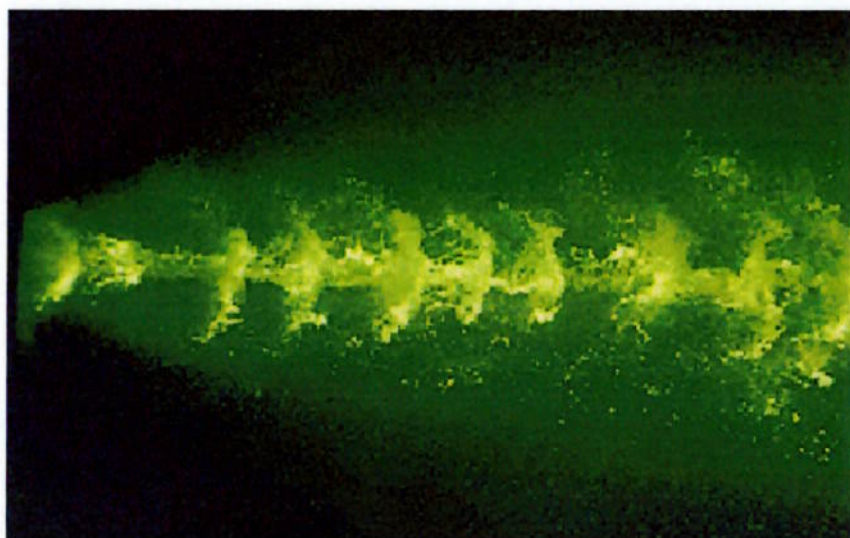


Figura 6.4: Aparência típica de um jato de água pulsante [5].

A peça oscilante (Fig. 6.2) dentro do bico é ligada a um transdutor piezelétrico ultrasônico (que contrai e expande devido a um campo elétrico aplicado). Estas oscilações influenciam na velocidade do fluxo, causando a quebra dele a uma determinada distância do bico (chamada de distância de quebra,  $l_0$ , conforme indicado na figura Y). Próximo ao bico ( $S'$ , dependendo das condições de operação), o jato permanece contínuo. Entre  $S'$  e  $l_0$ , o jato está num modo de transição (que é quando o jato começa a se formar). Além do  $l_0$  e, um pouco antes do jato se desintegrar em pequenas gotas, pulsos grandes e bem definidos são formados como pode ser visto nas figuras Y e Z. Todos os fatores geométricos listados na Fig. 6.2 influenciam a forma dos pulsos e, também, sua performance. A distância é um fator muito importante e, para uma aplicação particular, pode ser controlada através da configuração apropriada de valores para parâmetros de geometria, ultrasônicos e de água.

#### 6.1.2.2. Laser

Uma outra possibilidade para se obter um jato modulado é através do uso de feixe de laser. A figura 6.5 ilustra o mecanismo, onde o feixe de laser vaporiza um segmento do jato contínuo, transformando-o em um jato modulado.

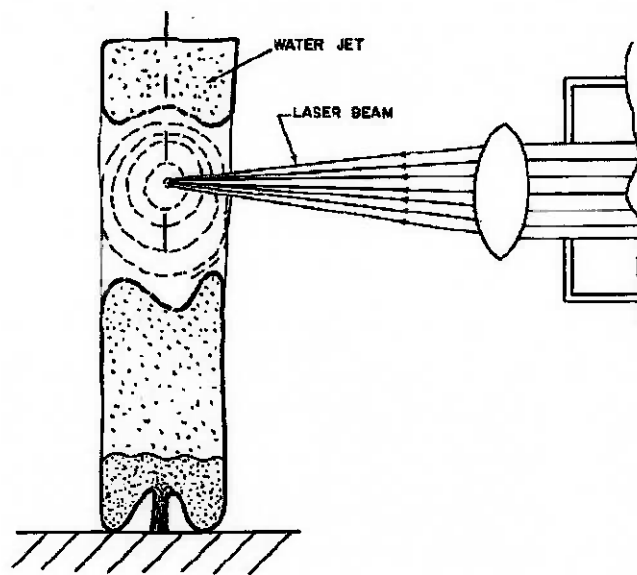


Figura 6.5: Geração de jato modulado por feixe de laser.

Mazurkiewicz (1983) estudou e elaborou as equações que relaciona a energia necessária, bem como a frequência para se obter o jato modulado:

Levando-se em consideração um jato de água de diâmetro  $d$  (m); diâmetro do feixe de laser  $L$  (m);  $\rho$  – densidade da água ( $\text{kg/m}^3$ )  $C_p$  – calor de vaporização da água ( $5,4 \times 10^5$  cal/kg);  $C_w$  ~ calor específico da água ( $103$  cal/kg  $^\circ\text{C}$ );  $\Delta t$  – diferença de temperatura entre o ponto de ebulição e a temperatura do jato existente ( $60$   $^\circ\text{C}$ );  $X$  – taxa de dissipação (2); e  $A$  – fator de conversão ( $0,24$  cal/J), a energia necessária para evaporar um segmento como este pode ser dada pela seguinte equação:

$$E = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l \cdot \rho \cdot (C_p + \Delta t \cdot c_w) \cdot x \cdot \frac{1}{A} [J] \quad (6.9)$$

Para um jato em movimento com velocidade  $v$ , a ação do feixe de laser deve ocorrer num intervalo de tempo igual a:

$$t = \frac{1}{v} \quad (6.10)$$

Isso significa que a potência de consumo será expressa segundo a equação seguinte:

$$p = 3925 \cdot d^2 \cdot v \quad (6.11)$$

Considerando que  $l = d$

Os resultados para estes cálculos são apresentados na figura 6.6, para diâmetros de jato diferentes e onde o jato está se movendo com a velocidade entre 250 m/s e 3000 m/s. A faixa de potência encontrada por esta equação é baixa o suficiente que lasers desse nível estão comercialmente disponíveis.

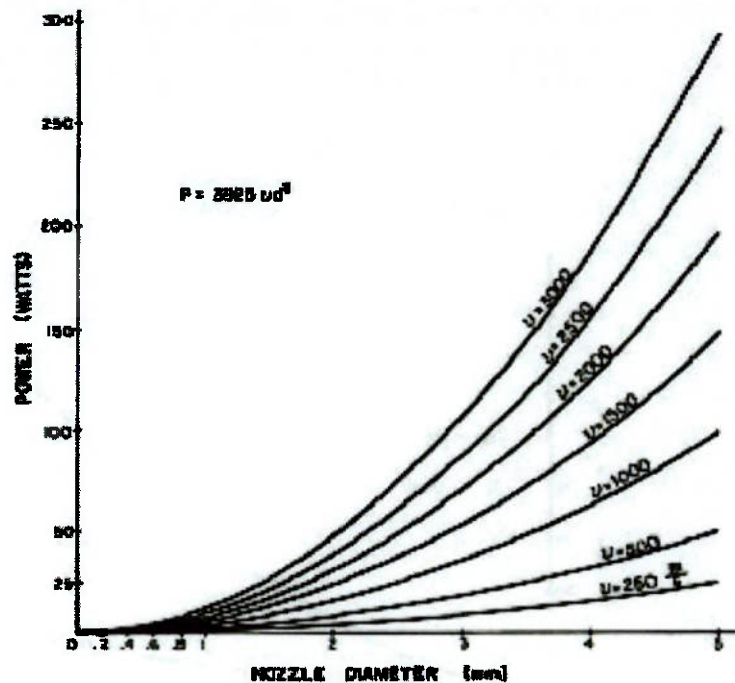


Figura 6.6: Potência versus diâmetro do bico e velocidade do jato [4].

De maneira a remover segmentos regulares tendo o comprimento  $l$  continuamente de um jato de água movendo-se a velocidade  $v$ , o feixe de laser deve pulsar a uma frequência de:

$$f = \frac{v}{6 \cdot l} \quad (6.12)$$

Os resultados para estes modelos estão apresentados nas figuras 6.7 e 6.8. É simples concluir que para diâmetros maiores de jato, a faixa de frequência do feixe de laser é mais estreita. Para um diâmetro de jato pequeno, essa faixa é bem ampla e para jatos muito rápidos, é impraticável.

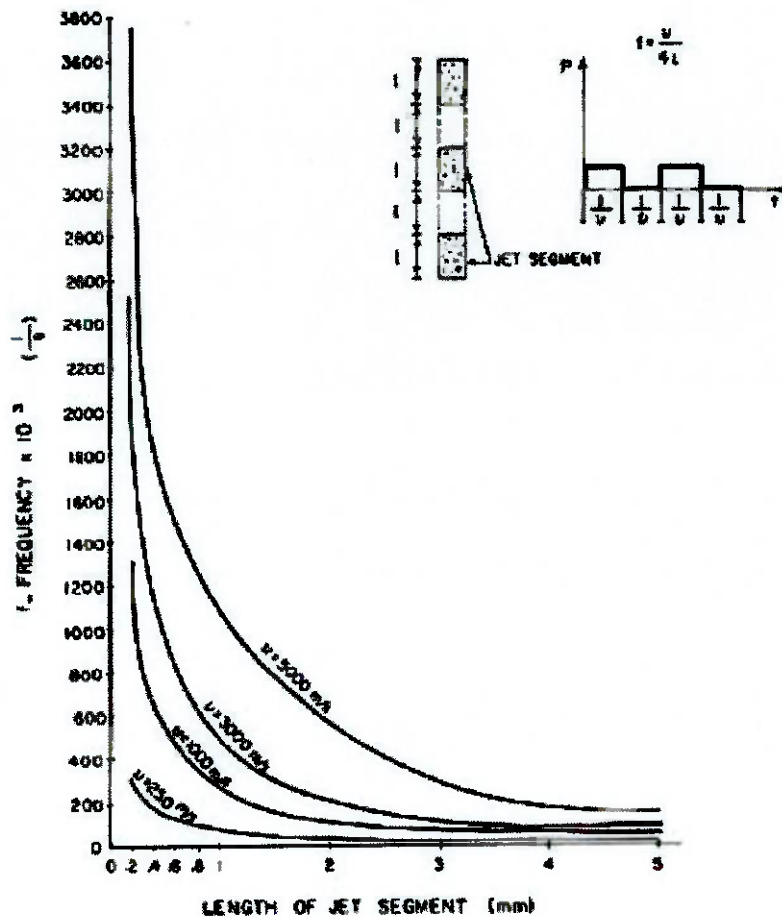


Figura 6.7: Frequência versus comprimento do segmento do jato [4].

O vazio entre os sucessivos segmentos de água devem ser longos o suficiente para que cada segmentos impacte numa superfície descoberta. Isto significa que os segmentos devem ter tempo para fluir da área alvo para um fluxo lateral.

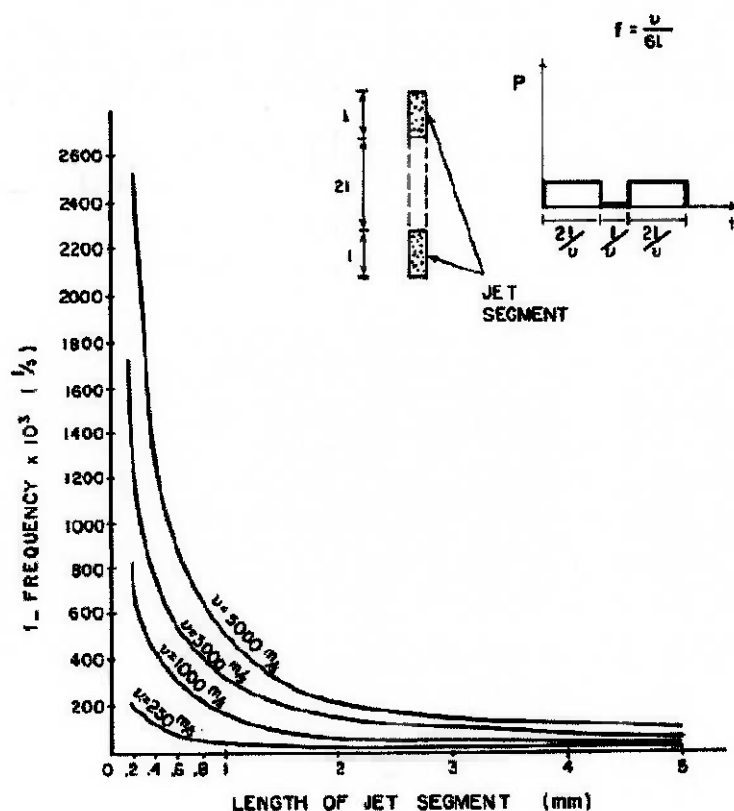


Figura 6.8: Frequência versus comprimento do segmento do jato [4].

O formato da ponta do segmento do jato é muito importante. Este formato dependerá do tempo de duração entre a vaporização e o impacto no alvo.

Neste tempo, devido ao arrasto e a tensão superficial, o formato do segmento ou da ponta do segmento irão variar. Ainda é possível influenciar o formato mudando a distância na qual o plano de corte do feixe de laser fica acima da superfície do alvo.

É possível influenciar o formato do topo do segmento. Por exemplo, focando o feixe do laser no centro do jato, é possível fazer uma ponta côncava. A ponta côncava poderia formar um jato Monroe que é, em essência, um micro jato concentrado muito poderoso.

## 6.2. Jato Cavitante

Existem diversas maneiras de se produzir cavitação como, por exemplo, através do uso de uma faísca elétrica, através de ondas de agitação supersônicas, etc.

A cavitação pode ser esperada num líquido escoando quando a pressão local cai até a pressão de vapor do líquido. Entretanto, ela irá ocorrer somente sob condições submersas de jato de água. A cavitação pode ser dividida em três tipos: cavitação *travelling*, cavitação fixa e cavitação por vortex. A cavitação fixa ocorre somente numa parede rígida. A cavitação *travelling* é o fenômeno em que as bolhas irão produzir, expandir e colapsar durante o escoamento. O tempo necessário para se ocorrer o processo inteiro é de 3 a 4 ms. A cavitação por vortex é induzida pelas bolhas que são geradas por obstáculos no escoamento como num cilindro circular.

Em Sun et al. (2005), foram realizados os primeiros experimentos utilizando-se a tecnologia de jato de água de alta pressão e bico convergente-divergente.

De acordo com o princípio geral da cavitação, a pressão do jato de água, a distância  $S$  (distância entre o bico e a amostra) e a estrutura do bico são os principais fatores determinantes.

A estrutura do bico é um fator chave que influencia a geração de cavitação. Geralmente, existem três tipos de bicos usados em jato de água cavitantes, conforme mostrados na figura 6.9.

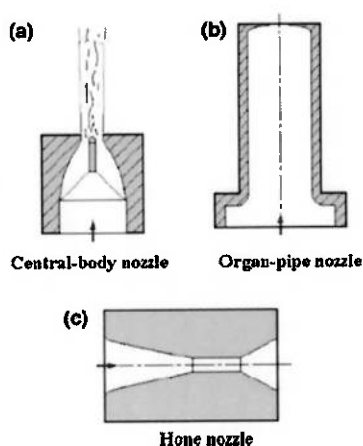


Figura 6.9: Bicos cavitantes [3].

O primeiro tipo, o bico de corpo centrado, possui um cilindro na saída do bico. A área de arrasto é então formada atrás do cilindro e, em condições de escoamento favoráveis, haverá cavitação nessa área.

O segundo tipo, o bico chamado *organ-pipe resonator* que induz uma oscilação na pressão. A amplitude de oscilação de pressão será amplificada quando a pressão da frequência oscilante é consistente com a frequência inerente da câmara de ressonância. Assim, uma grande estrutura vortex é formada, que irá melhorar o efeito cavitante.

O terceiro tipo é submergindo o jato para melhorar o *shearing* entre o jato e a água ao redor. Vortex será produzido dentro da camada de *shearing* e como a pressão no centro do vortex pode ser menor do que a pressão de vapor local, a cavitação é induzida.

Diversos estudos já foram realizados sobre cavitação em jatos de água e, segundo Yamauchi, 1992 apud Sun, 2005, a força de impacto devido a cavitação é importante e pode até ser melhor do que a força de impacto de partículas sólidas a alta velocidade.

## **7. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO**

Conforme observado na revisão literária descrita nos capítulos 4 e 5, obtemos os seguintes dados a serem trabalhados e implementados no projeto da máquina de corte por jato de água.

### **7.1. Parâmetros hidráulicos**

Conforme visto no item 5.2, a pressão de operação da bomba, relaciona-se de forma proporcional à capacidade de corte do conjunto, assim, quanto maior a pressão, melhor será sua eficiência. Porém, por restrições construtivas, a elevação dessa pressão torna-se limitada, deixando esse projeto dependente de fabricantes de bombas de ultra-alta pressão. Por um outro lado, as bombas de ultra-alta pressão encontradas no mercado estão divididas basicamente em dois grupos: bombas com intensificador e bombas de pistão. As bombas com intensificador possuem capacidades de até 80.000PSI, porém são extremamente caras e exigem manutenção contínuas. Já as bombas de pistão são mais baratas, porém, estão limitadas a pressões da ordem de 40.00 PSI (aproximadamente 275 MPa). Dessa forma, o conjunto de geração do jato de água a ultra-alta pressão será uma bomba da marca WOMA modelo M-55, com capacidade de 40.000 PSI.

O diâmetro ótimo do orifício da jóia, conforme mostrado em itens anteriores, situa-se em uma faixa de 0,25 a 0,3 mm, e deve ser feita de materiais extremamente duros, tais como diamante, rubi ou safira. A fim de minimizar os custos da máquina, porém sem reduzir sua eficiência, a jóia a ser utilizada no projeto terá diâmetro do orifício de 3 mm, feita de safira.

### **7.2. Parâmetros de corte**

Os parâmetros de corte anteriormente apresentados são funções de fatores independentes da máquina a ser projetada. São eles: a velocidade de corte, o número de passes, o tempo de exposição, a distância entre o bico e o material e o ângulo de



corte. Estes parâmetros são dependentes de forma mais acentuadas de fatores como: material a ser cortado, bem como sua espessura, o tipo de corte a ser feito e o acabamento desejado. Assim, a máquina a ser projetada deve permitir regulagem de forma a aumentar sua eficiência. A velocidade de corte, o número de passes e o tempo de exposição, serão regulados manualmente pelo operador. A distância entre o bico e o material ótima é de aproximadamente 2 mm, cabendo assim, sua regulagem mediante a espessura do material a ser cortado. O ângulo de corte ótimo, mencionado como valores entre 80 e 85°, deve ser utilizado apenas para cortes lineares, de forma que o jato se posicione de forma avante ao movimento do cabeçote.

### **7.3. Parâmetros de mistura**

Os parâmetros de mistura são essencialmente dependentes de fatores de forma do bico. Assim, o bico de corte a ser projetado deve possuir diâmetro interno de aproximadamente 1 mm e comprimento entre 60 e 80 mm. Um outro fator determinante para a otimização da mistura é a distância entre o bico e a entrada do abrasivo. Porém, conforme mostrado na figura 4.4, este fator torna-se insignificante se tomarmos uma faixa de 2 a 8 mm para diâmetros internos do bico de 1 mm.

### **7.4. Parâmetros do Abrasivo**

Os parâmetros que regem a eficiência do corte, função do abrasivo aplicado são: a vazão mássica do abrasivo, o tamanho médio das partículas e seu formato. A vazão mássica de abrasivo deve ser regulada conforme a dureza do material a ser cortado e ao acabamento desejado. Para materiais duros, tais como mármore e granitos, a vazão mássica ótima de abrasivo situa-se perto de 8 a 9 g/s. O tamanho médio das partículas, em torno de 100 µm, e seu formato o mais pontiagudo possível. Devida a maior abundância no mercado, o abrasivo mais recomendado para esta finalidade é a granália, com gramatura de 100 µm. Porém, caberá ao usuário definir a melhor opção, levando em conta custos e até a possibilidade de reaproveitamento.

### 7.5. Custos de Projeto

Os custos do projeto são divididos em duas partes: materiais para fabricação (incluindo peças ou equipamentos terceirizados) e montagem.

O detalhamento de cada processo e a lista de componentes está em anexo. De forma resumida, o custo levantado para implementação deste projeto é: custo total do equipamento R\$ 7.932,36, custo de material: R\$ 7.212,36 e custo de montagem: R\$ 720,00

### 7.6. Custo de operação/Exemplo de aplicação

Conforme mencionado, os parâmetros de abrasivo, velocidade de corte e numero de passes variam de acordo com o material a ser usinado e do acabamento desejado.

Para ilustrar o custo de operação de uma máquina de corte por jato de água abrasivo, simularemos a usinagem de um tampo de pia padrão com formato elíptico. A figura 7.1 ilustra o modelo da usinagem:

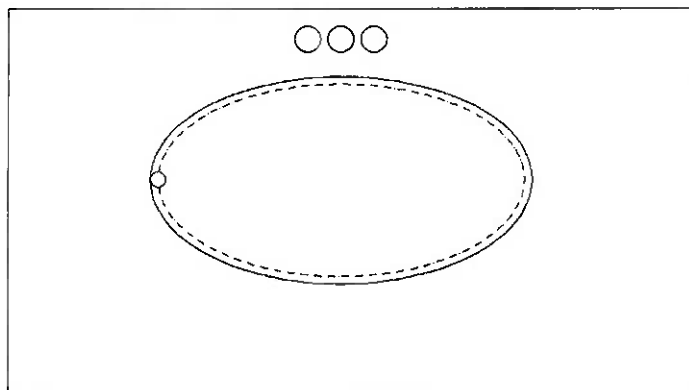


Figura 7.1: Tampo de pia elíptico padrão.

O material é granito com uma polegada de espessura. A velocidade de corte ideal para o material em questão é de 22mm/s, e o consumo de abrasivos, de 8 a 9 g/s. O custo médio de abrasivo a base de granada é de aproximadamente R\$ 1,45/kg. Assim, custo de insumos é de aproximadamente R\$ 0,53 o metro linear de corte. Para o exemplo em questão, esse custo é de aproximadamente R\$ 0,84. Devemos lembrar que esse custo não inclui o custo de amortização nem o custo de manutenção da máquina.

## 8. RESULTADOS E CONCLUSÕES

O princípio de funcionamento do corte por jato de água abrasivo baseia-se na transformação de energia de pressão da água em energia cinética, onde a mistura água, ar e abrasivo são acelerados. A remoção de material é feita através do choque entre as partículas da mistura e o material a ser usinado, resultando em deformações plásticas e causando microfraturas. Os principais parâmetros que regem a eficiência de corte estão intimamente relacionados, sendo eles: a pressão de operação da bomba, o diâmetro do orifício da jóia, a velocidade de corte transversal, o número de passes, a distância entre o bico de corte e o material a ser usinado, o ângulo de impacto, o comprimento e o diâmetro interno do bico, a vazão mássica do abrasivo e suas características: o formato e o diâmetro das partículas, e sua dureza. Os valores ótimos obtidos para os parâmetros citados acima foram: pressão de operação da bomba de aproximadamente 275 MPa, diâmetro do orifício da jóia de aproximadamente 0,25~0,3 mm, distância entre o bico de corte e o material a ser usinado de aproximadamente 3 a 5 mm, ângulo de impacto entre 80 e 85°, comprimento do bico de 60 a 80 mm e diâmetro interno próximos de 1 mm, utilização de abrasivos de diâmetro médio de 100  $\mu$ m provenientes de materiais britados. Os parâmetros de velocidade transversal de corte, o número de passes e a vazão mássica de abrasivo, dependerão do material a ser usinado, de acordo com a dureza, a espessura e o tipo de acabamento desejados. Para peças em granito de uma polegada, a velocidade de corte indicada é de 22 mm/s, e a vazão mássica de abrasivo, de 8 a 9 g/s. Dessa maneira, o custo de operação da máquina (apenas insumos) é de R\$ 0,53 o metro linear de corte, já que o custo de abrasivo (granada), é em média R\$ 1,45 por quilo. O custo estimado para a máquina projetada apresentada no trabalho, foi de aproximadamente R\$ 8.000,00, que se comparado ao custo de máquinas importadas com comando numérico computadorizado (aproximadamente US\$ 40.000,00, OMAX 2626) é bem inferior. Essa enorme diferença se dá pela ausência de controladores e atuadores eletrônicos, tornando-se uma máquina de fácil utilização, porém, com precisão, capacidade produtiva e versatilidade bem inferiores. Os métodos alternativos de geração de jato de água encontram-se atualmente em pleno estágio de desenvolvimento. Entretanto, aplicações desses métodos em

máquinas comercialmente viáveis ainda encontram-se em estudo. Grandes universidades e centros de pesquisa têm demonstrado interesse nesta área, principalmente em países como a China, Austrália, República Tcheca e EUA.

Os jatos de alta pressão ultrasônicos e a laser estão num estágio de desenvolvimento superior ao jato de alta pressão gerado por cavitação, cujo os estudos ainda encontram-se em estágio inicial. O principal fator a ser estudado num jato cavitante é a geometria do bico utilizado.

O efeito da pressão *water hammer* traz um grande aumento de performance nos jatos de alta pressão ultrasônico e a laser, possibilitando pressões atuantes na superfície do material cortado bem maiores (até 11 vezes) do que a pressão de operação da bomba como, por exemplo, para uma pressão de operação de 103,5 MPa, seria possível atingir, no alvo, uma pressão de 693 MPa (100.000 psi).

Com o aproveitamento dessas tecnologias, será possível uma grande redução no custo de uma máquina de corte por jato de água, pois o componente de custo mais elevado é a bomba de alta pressão que poderia ter sua pressão de operação drasticamente reduzida. Além do custo reduzido, será possível, também, um grande aumento de performance, pois a pressão do jato no alvo será comparável aos jatos gerados por bombas de super-pressão.

## 9. ANEXO

### ANEXO 1:

#### LISTA DE COMPONENTES

##### 1. Estrutura:

1.1- Perfil quadrado 50 x 50 espessura 3 mm comprimento 1150 mm

Material: ABNT 1010

Quantidade: 4 peças

Peso total: 20,236 kg

Custo total: R\$ 109,88

1.2- Perfil quadrado 50 x 50 espessura 3 mm comprimento 900 mm

Material: ABNT 1010

Quantidade: 5 peças

Peso total: 19,796 kg

Custo total: R\$ 107,50

1.3- Perfil quadrado 50 x 50 espessura 3 mm comprimento 725 mm

Material: ABNT 1010

Quantidade: 4 peças

Peso total: 12,758 kg

Custo total: R\$ 69,27

1.4- Perfil “L” 50 x 50 espessura 3 mm comprimento 800 mm

Material: ABNT 1010

Quantidade: 6 peças

Peso total: 10,558 kg

Custo total: R\$ 57,33

- 1.5- Perfil “L” 50 x 50 espessura 3 mm comprimento 800 mm  
Material: ABNT 1010  
Quantidade: 6 peças  
Peso total: 6,38 kg  
Custo total: R\$ 34,64
- 1.6- Perfil “L” 20 x 20 espessura 3 mm comprimento 800 mm  
Material: ABNT 1010  
Quantidade: 3 peças  
Peso total: 6,126 kg  
Custo total: R\$ 33,26
- 1.7- Chapa 1600 x 900 espessura 1,5 mm  
Material ABNT 1010  
Quantidade: 2 peças  
Peso total: 33,696 kg  
Custo total: R\$ 182,97
- 1.8- Chapa 900 x 900 espessura 1,5 mm  
Material: ABNT 1010  
Quantidade: 2 peça  
Peso total: 18,954 kg  
Custo total: R\$ 102,92
- 1.9- Parafuso cabeça chata M-4 comprimento 7 mm  
Material ABNT 1045  
Quantidade: 32 peças  
Custo total: R\$ 68,8

## 2. Reservatório:

### 2.1- Chapa 1500 x 800 espessura 6 mm

Material: ABNT 1020

Quantidade: 1 peça

Peso total: 56,16 kg

Custo total: R\$ 304,95

### 2.2- Chapa 1500 x 741 espessura 6 mm

Material: ABNT 1020

Quantidade: 2 peças

Peso total: 104,036 kg

Custo total: R\$ 569,92

### 2.3- Chapa 890 x 741 espessura 6 mm

Material: ABNT 1020

Quantidade: 2 peças

Peso total: 61,728kg

Custo total: R\$ 335,18

## 3. Grade suporte de peças:

### 3.1- Chapa 868 x 741 espessura 1.5 mm

Material: ABNT 1020

Quantidade: 14 peças

Peso total: 105,354 kg

Custo total: R\$ 572,07

### 3.2- Chapa 1488 x 100 espessura 20 mm

Material: ABNT 1020

Quantidade: 4 peças

Peso total: 92,851 kg

Custo total: R\$ 504,18

3.3- Parafuso halen M-10 comprimento 25 mm

Quantidade: 24 peças

Custo total: R\$ 63,60

4. Conjunto de movimentação:

4.1- Trilho para guia linear SR 20V comprimento 1500 mm

Quantidade: 2 peças

Custo total: R\$ 1800,00

4.2- Trilho para guia linear SR 20V comprimento 892 mm

Quantidade: 1 peça

Custo total: R\$ 535,2

4.3- Parafuso halen M-5 comprimento 25 mm – material ABNT 1040

Quantidade: 24 peças

Custo total: R\$ 63,60

4.4- Porca M-5

Material ABNT 1010

Quantidade: 24 peças

Custo total: R\$ 32,40

4.5- Parafuso halen M-5 comprimento 20 mm – material ABNT 1040

Quantidade: 4 peças

Custo total: R\$ 10,60

4.6- Guia linear de esferas SR 20V fabricante THK

Quantidade: 3 peças

Custo total: R\$ 750,00



5. Cabeçote:

5.1- Chapa 200 x 127 espessura 10 mm

Material: ABNT 1020

Quantidade: 1 peça

Peso total: 3,962 kg

Custo total: R\$ 21,52

5.2- Abraçadeira  $\Phi_{\text{int}} = 23 \text{ mm}$   $\Phi_{\text{ext}} = 31 \text{ mm}$

Material alumínio

Quantidade: 1 peça

Custo total: R\$ 1,20

5.3- Barra circular  $\Phi_{\text{ext}} = 22 \text{ mm}$  comprimento 320 mm

Material: ABNT 1040

Quantidade: 1 peça

Peso total: 0,948 kg

Custo total: R\$ 6,45

5.4- Barra circular  $\Phi_{\text{ext}} = 29 \text{ mm}$  comprimento 62 mm

Material: ABNT 1040

Quantidade: 1 peça

Peso total: 0,319 kg

Custo total: R\$ 2,17

5.5- Barra circular  $\Phi_{\text{ext}} = 22 \text{ mm}$  comprimento 65 mm

Material: ABNT 1040

Quantidade: 1 peça

Peso total: 0,192 kg

Custo total: R\$ 1,31

5.6- Barra circular  $\Phi_{\text{ext}} = 5 \text{ mm}$  comprimento 21,5 mm

Material latão

Quantidade: 1 peça

Peso total: 0,010 kg

Custo total: R\$ 0,30

5.7- Barra circular  $\Phi_{\text{ext}} = 26 \text{ mm}$  comprimento 70 mm

Material: ABNT 1020

Quantidade: 1 peça

Peso total: 0,290 kg

Custo total: R\$ 1,57

5.8- Mangueira:  $\Phi_{\text{int}} = 5 \text{ mm}$  espessura 1 mm comprimento 180 mm

Material: borracha

Quantidade: 1 peça

Custo total: R\$ 0,50

5.9- Jóia  $\Phi_{\text{orifício}} = 0,3 \text{ mm}$   $\Phi_{\text{corpo}} = 12 \text{ mm}$  –

Material: aço e safira

Quantidade: 1 peça

Custo: R\$ 100,97

5.10- Bico de corte  $\Phi_{\text{int}} = 0,8 \text{ mm}$   $\Phi_{\text{ext}} = 10 \text{ mm}$  comprimento 60 mm –

Material: carbeto de silício

Quantidade: 1 peça

Custo: R\$ 880,00

## 6. Mão de obra:

6.1- Soldagem da estrutura:

Horas homem de serviço estimado: 2 horas.

Custo: R\$ 120,00

6.2- Montagem da estrutura:

Horas homem de serviço estimado: 20 horas.

Custo: R\$ 200,00

6.3- Usinagem das peças 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7:

Horas de torno estimado: 2 horas

Horas de fresa estimado: 3 horas

Custo: R\$ 400,00

7. Dados Gerais do Equipamento:

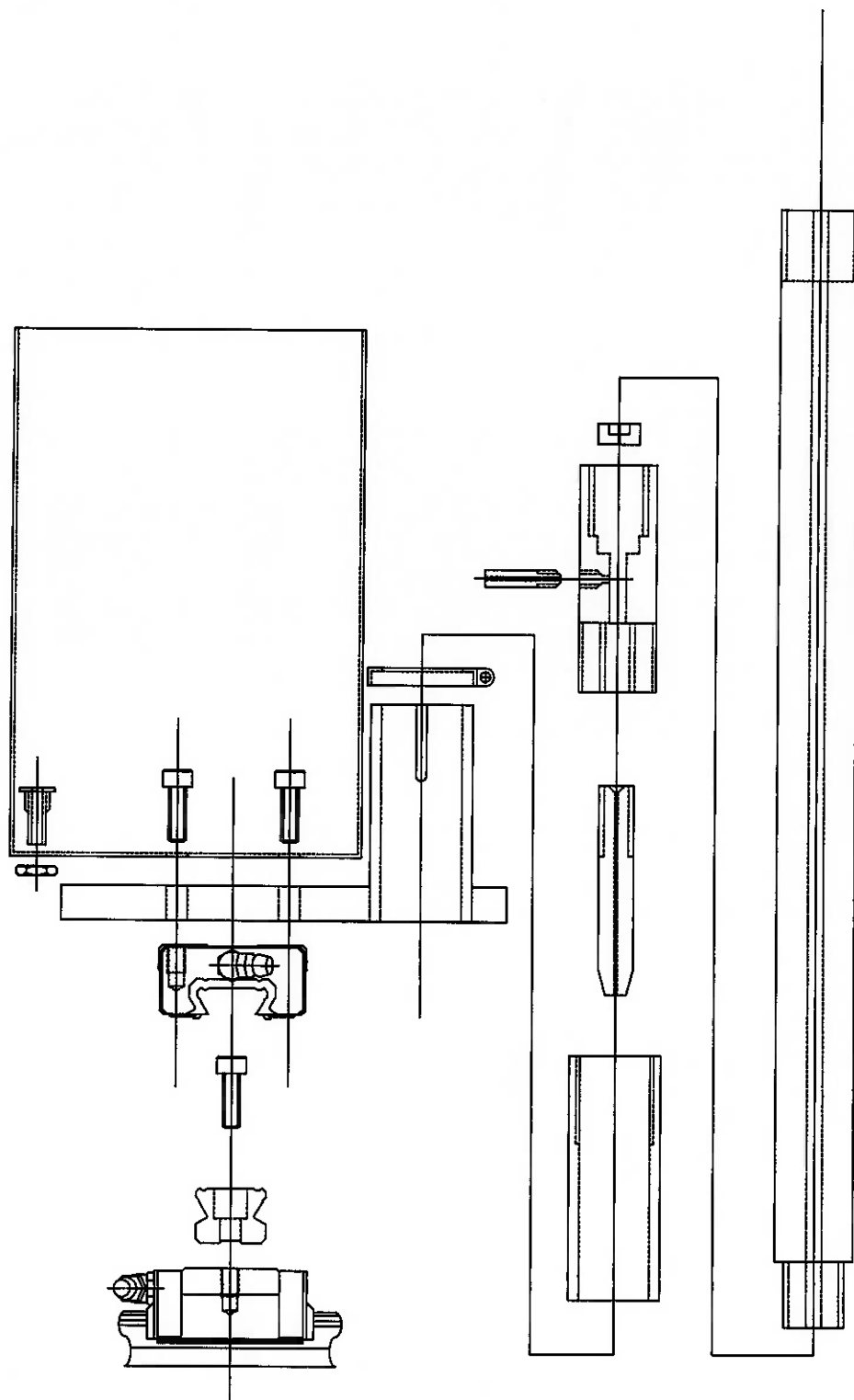
7.1- Peso total: 554,35 kg

7.2- Custo total do equipamento: R\$ 7.932,36

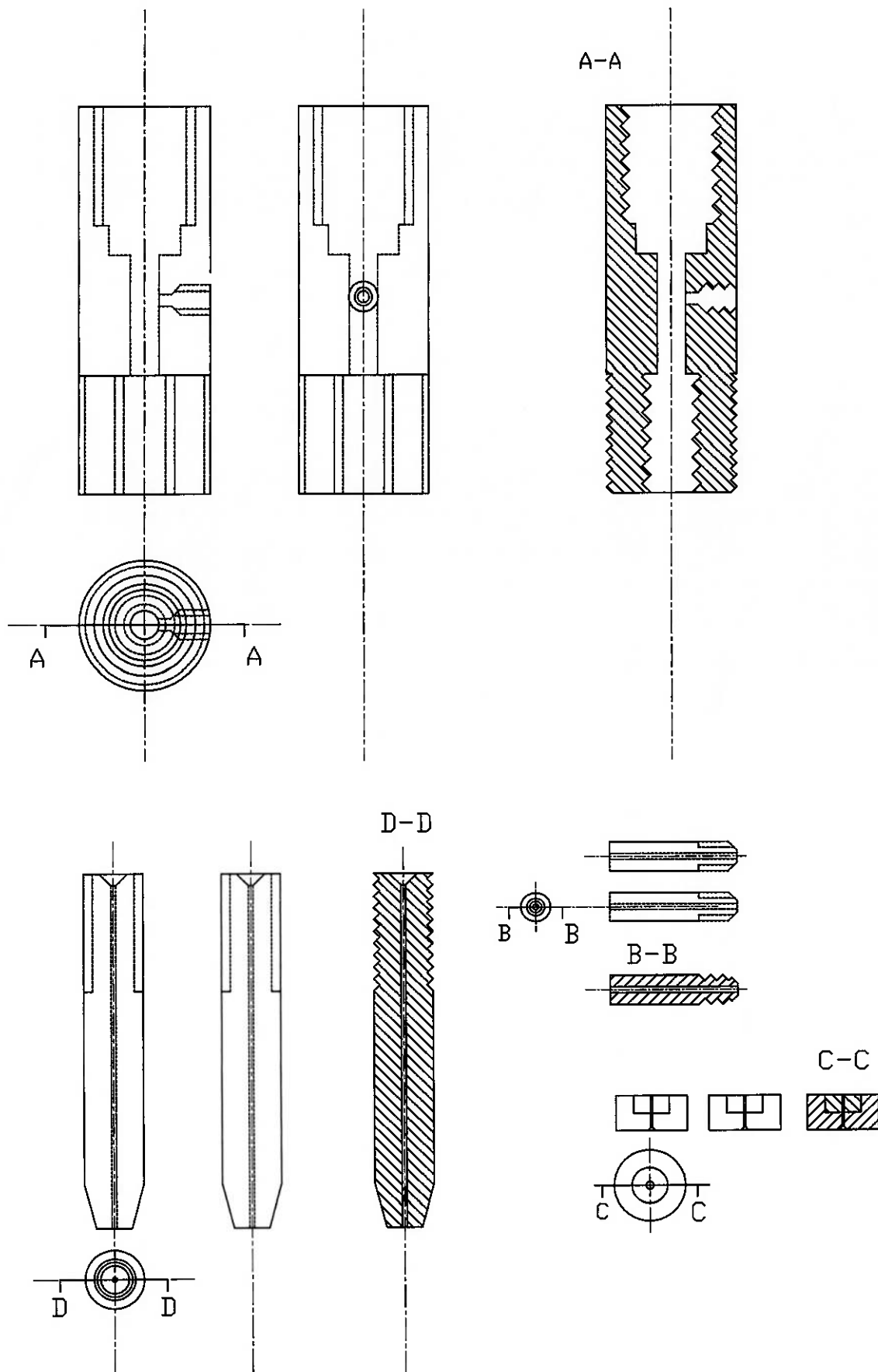
Custo de material: R\$ 7.212,36

Custo de fabricação e montagem: R\$ 720,00

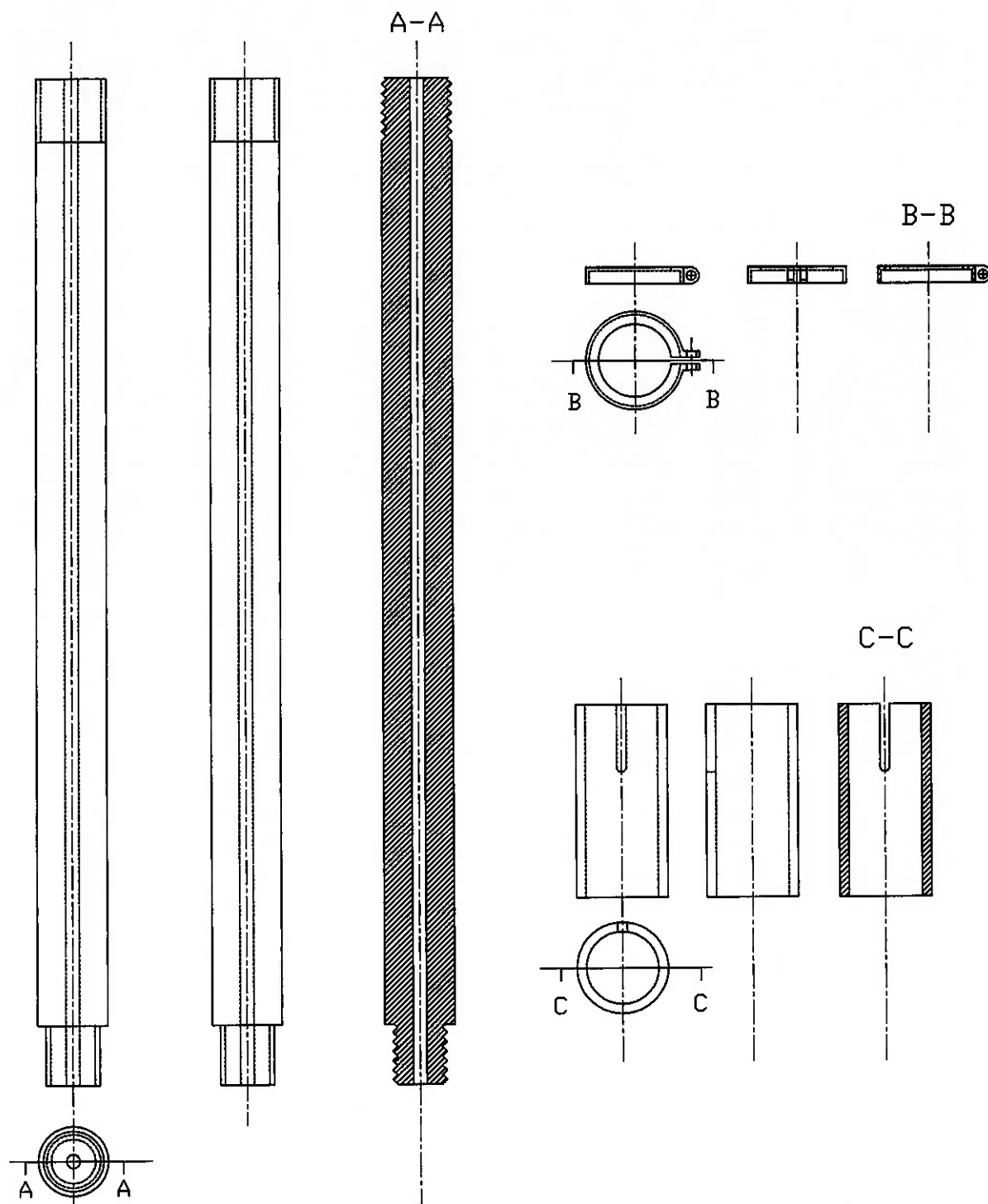
ANEXO 2:



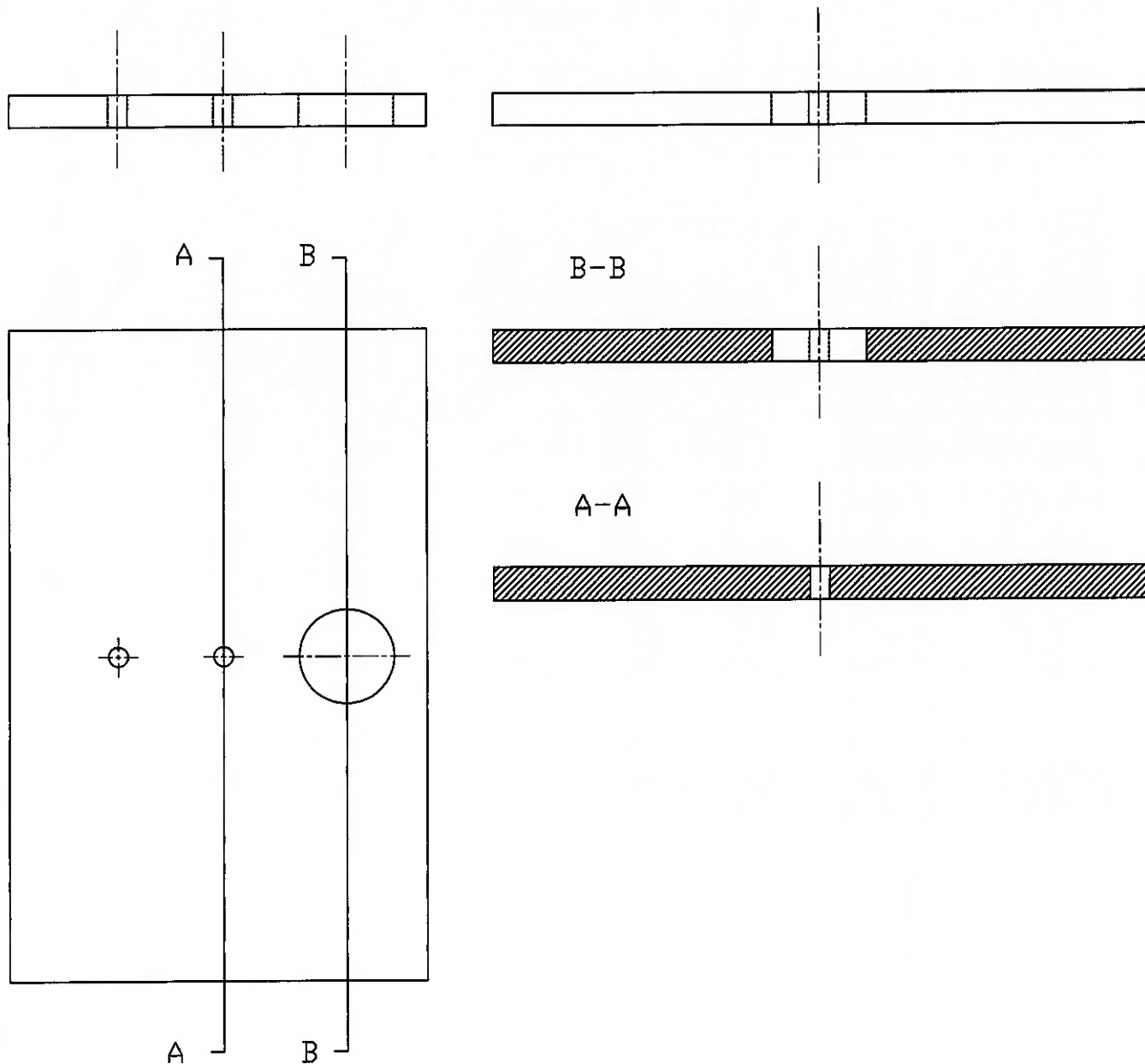
3104338 3346401	LUIZ FERNANDO K. IMAI MARCELO K. KOBAYASHI	T-01	AMILTON SINATORA
PME 2599 - PROJETO INTEGRADO II			EPUSP
1:2	VISTA EXPLODIDA CABEÇOTE	19/11/2005	



3104338	LUIZ FERNANDO K. IMAI	T-01	AMILTON
3346401	MARCELO K.KOBAYASHI		SINATORA
PME 2599 - PROJETO INTEGRADO II			EPUSP
1:1	COMPONENTES: J6IA,BICO E CAMARA DE MISTURA	19/11/2005	



3104338 3346401	LUIZ FERNANDO K. IMAI MARCELO K.KOBAYASHI	T-01	AMILTON SINATORA
PME 2599 - PROJETO INTEGRADO II			EPUSP
1:2	COMPONENTES: TUBO FIXADOR, ABRAÇADEIRA E TUBO GUIA	19/11/2005	



3104338	LUIZ FERNANDO K. IMAI	T-01	AMILTON
3346401	MARCELO K.KOBAYASHI		SINATORA
PME 2599 - PROJETO INTEGRADO II			EPUSP
1/2	COMPONENTES: PLATAFORMA	19/11/2005	



## 15. LISTA DE REFERÊNCIAS

1. MOMBER, A.W.; KOVACEVIC, R. **Principles of Abrasive Water jet Machining**. WOMA Apparetebau GmbH, Duisburg, Germany. Suthern Methodist University, Dallas, USA. Springer – Verlag London Ltd. 1998. 394p.
2. WANG, J. **Abrasive Waterjet Machining of Engineering Materials**. Switzerland: Trans Tech Publications, 2003. p. 106.
3. SUN, Z., KANG, X.Q., WANG, X.H. **Experimental system of cavitation erosion with water-jet**. Materials & Design Journal, Vol. 26. 2005. p. 59-63.
4. MAZURKIEWICZ, M. **An analysis of one possibility for pulsating a high pressure water jet**. In: U.S. Water Jet Conference, 2<sup>nd</sup>. Rolla, Missouri, Maio, 1983. Editores: David A. Summers e Frank F. Haston, U.S, 1983. p. 17-27.
5. VLN ADVANCED TECHNOLOGIES INC. Gloucester, Ontário, Canadá. Apresenta informações sobre a empresa e assuntos relacionados com a tecnologia de jato de água. Disponível em: < <http://www.vln-tech.com> > . Acesso em: 25 de nov. 2005.

7. LAUAND, C.T. et al. **Water Jet Researches at University of São Paulo. Part 4 – Dimension Stone Exploitation With High-Pressure Waterjets.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 17<sup>th</sup>. Mainz, September, 2004. PAPERS: BHR Group Limited – Editor: Paul Lake, United Kingdom, 2004.
  
8. LAUAND, C.T.; HENNIES, W.T.; CORTÉS, G.R.M. **A Review of the Research Activity at USP (Brazil) on Rock Cutting with AWJ.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 17<sup>th</sup>. Mainz, September, 2004. PAPERS: BHR Group Limited – Editor: Paul Lake, United Kingdom, 2004. p. 307 – 314.
  
9. LAUAND, C.T.; HENNIES, W.T.; CORTÉS, G.R.M. **Dimensional Stone Cutting with Water Jet: Surface Finishing.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MINE PLANNING AND EQUIPMENT SELECTION, 11<sup>th</sup>. Bouzov – Ostrava, Setembro, 2002. Proceeding: Eleventh International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection. Bouzov, Czech Republic, Setembro, 2002. p. 43 – 48.
  
10. CHAHINE, G.L.; CONN, A.F.; JOHNSON, V.E.; FREDERICK, G.S. **Cleaning and cutting with self-resonating pulsed water jets.** In: U.S. Water Jet Conference, 2nd. Rolla, Missouri, Maio, 1983. Editores: David A. Summers e Frank F. Haston, U.S, 1983. p. 167-176.
  
11. FOLDYNA, J. et al. **Utilization of ultrasound to enhance high-speed water jet effects.** In: Applications of Power Ultrasound in Physical and Chemical Processing. Editor J.Y. Hihn. Toulouse, Progep, 2003. p. 323-331.
  
12. HASHISH, M.; STEELE, D.E.; BOTHELL, D.H. **Machining with super-pressure (690 MPa) Waterjets.** Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 37, No. 4. 1997. p. 465-479.

13. HASHISH, M. **Observations on cutting with 600 MPa waterjets.** Journal of Pressure Vessel Technology. Vol. 124. 2002. p. 229-233.
14. MOHAMED, M.A.K. **Waterjet cutting up to 900 MPa.** 2004. Dissertação (Doutorado). Universidade de Hannover.
15. SUSUZLU, T.; HOOGSTRATE, A.M., KARPUSCHEWSKI, B. **Initial research on the ultra-high pressure waterjet up to 700 MPa.** Journal of Materials Processing Technology. Vol. 149. 2004. p. 30-36.
16. SHISHKIN, D.V. **Development of icejet based machining technology.** 2002. Dissertação (Doutorado). Instituto de Tecnologia de Nova Jersey.

## 16. LISTA DE MATERIAIS PESQUISADOS

1. CORTES, G.R.M. **Métodos de Corte de Rochas com Jato de Água Abrasivo**. 2003. 132p. Dissertação (Doutorado). Escola Politécnica – Universidade de São Paulo.
2. LAUAND, C.T. **Contribuição ao estudo do corte de rochas por jato d'água abrasivo**. 2001. 124p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica – Universidade de São Paulo.
3. SAVANICK, R.C Hydraulic Mining. In: LABUS T.J. **Fluid Jet Technology: Fundamentals and Application**. 4<sup>th</sup> ed. Saint Lous, Water Jet Technology Association. 1999.
4. LAUAND, C.T. et al. **Performance of Water Jet Cutting System in Dimension Stone**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE IN WATERJETTING, 9<sup>th</sup>. St. Louis, 2001. PROCEEDING: 9<sup>th</sup>. International Waterjetting. St. Louis, 2001. p.243 – 265.
5. LAUAND, C.T. et al. **Water Jet Researches at University of São Paulo. Part 1 – Water Jet Cut Process Optimisation: An Advanced Method of Experimentation**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 16<sup>th</sup>. Aix-en-Provence, Outubro, 2002. PAPERS: BHR Group Limited – Editor: Paul Lake, United Kingdom, 2002. p.451 – 456.
6. LAUAND, C.T. et al. **Water Jet Researches at University of São Paulo. Part 3 – Waterjet Methods of Cutting Dimensional Stone**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 11<sup>th</sup>. Aix-en-Provence. Houston, 2003. PROCEEDING: 11<sup>th</sup>. International Conference in Waterjetting. Houston, 2003.