

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

***FURAÇÃO POR ESCOAMENTO E
ROSQUEAMENTO POR CONFORMAÇÃO***

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

JOÃO CARLOS OLIVEIRA LOPES

FLORIANÓPOLIS, ABRIL DE 1994

**FURAÇÃO POR ESCOAMENTO E
ROSQUEAMENTO POR CONFORMAÇÃO**

JOÃO CARLOS OLIVEIRA LOPES

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE MESTRE EM ENGENHARIA
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
FABRICAÇÃO, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA.



Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr.-Ing.
Orientador

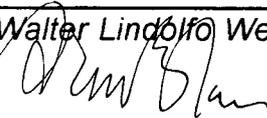


Prof. Antonio Fábio Carvalho da Silva, Dr. Eng. Meo.
Coordenador da Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA :



Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr.-Ing.



Prof. Arno Blass, PhD.



Prof. Armando Albertazzi Júnior, Dr. Eng. Mec.

Aos meus pais

Carlos e Maria

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner pelo apoio e orientação, e principalmente por ter acreditado desde o início na minha pessoa.

À CAPES e CNPq - Programa RHAE - Mecânica de Precisão, pela concessão da bolsas de estudos e recursos que viabilizaram este trabalho.

À firma Flowdrill b.v. da Holanda pela doação de diversas ferramentas.

Ao prof. Dr.-Ing. Gunther Kretschmer, da Universidade de Siegen na Alemanha, por ter nos enviado amplo material bibliográfico de sua autoria.

A Universidade de Kassel da Alemanha e ao Prof. Dr.-Ing. Franz Tikal pela possibilidade de desenvolvimento conjunto deste linha de pesquisa..

Ao pesquisador Rolf Bertrand Schroeter pela amizade, paciência e inestimável ajuda na realização de todos os trabalhos.

Ao amigo e mestrando Ivan da Costa Pereira Filho pelo companheirismo, pelas idéias, e pela grande cooperação em todos os momentos.

Aos bolsistas de Iniciação Científica, Daniel Carlos da Silva, Eduardo Schroeder, Otacílio Cardoso Duarte Filho e Rodrigo de Oliveira Pacheco, pela dedicação na realização dos ensaios, confecção de relatórios, artigos, dissertação e todos os trabalhos apresentados no escopo deste estudo.

Também aos bolsistas Sandro Petry Laureano Leme, Carlos Gommersbach, Manfred Molz, Hewerson Raniere da Silva, Durval João de Barba Filho e Ederson Massayuki Kuriki, que contribuíram diretamente para realização deste estudo.

Ao mestre Rolando Vargas Vallejos e aos mestrandos Aloísio José Schuitek, Paulo Roberto de Oliveira, Ricardo Machado Peres, Luciano Moreira, Daniel Hioki, e Cleiton Rodrigues Teixeira pelas sugestões e apoio dispensados.

A pesquisadora Yara Lemr pelo apoio computacional na produção de software e utilização de recursos que facilitaram em muito a análise de dados dos ensaios.

A todos os colegas da pós graduação, em especial ao mestrando Joel Martins Crichigno, pela especial ajuda na pesquisa bibliográfica.

A todos os técnicos do Laboratório de Mecânica de Precisão, em especial ao pesquisador José Roberto Okida, pelo indispensável apoio na confecção dos dispositivos e ferramentas, além da ajuda na realização dos ensaios.

Ao pessoal do Laboratório de Materiais, mestrando Paulo César Borges, ao pesquisador Carlos Alberto Grassmann e ao técnico Ivens Wagner de Abreu Júnior pela disposição e ajuda em todos os trabalhos realizados naquele laboratório.

Ao pessoal do Laboratório de Hardware, pelo empréstimo de equipamentos necessários à pesquisa, bem como auxílio na utilização.

À biblioteconomista Vera Lúcia Quadro Duarte e a secretária Rosimar Maria Franzói.

A minha irmã Cristiane Lopes Oliveira, pela análise química do lubrificante

A minha namorada Tei Peixoto Hiratsuka, pelo apoio.

Aos colegas de curso e professores da Engenharia Mecânica.

A todos colegas que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Neste trabalho são estudados dois novos processos de fabricação. A furação por escoamento, utilizada na execução de furos em chapas metálicas sem a remoção de cavacos. E também o processo de rosqueamento por conformação, onde é realizada uma rosca interna com uma ferramenta que tem a face de trabalho na forma de um parafuso.

Na furação por escoamento são estudadas as influências das variáveis do processo - rotação, avanço, espessura da chapa, diâmetro e tipo de ferramenta - sobre as características do processo e resultados de trabalho. No rosqueamento por conformação são analisados os momentos torçores envolvidos e posteriormente a resistência, dureza e forma das roscas, sendo seus resultados comparados com os obtidos através do processo convencional por usinagem.

No processo de furação por escoamento observou-se a necessidade de altas rotações, responsáveis pela geração de calor na região de trabalho. No início do processo e principalmente na furação de chapas com espessuras maiores verificam-se forças de avanço altas.

No rosqueamento por conformação percebe-se que os momentos torçores na conformação das roscas e a resistência das roscas formadas, bem como a dureza dos filetes mostraram resultados superiores aos encontrados no processo convencional por usinagem e, o que é de sobremodo interessante, acima dos valores recomendados por norma.

Os resultados encontrados mostraram a possibilidade de aplicação econômica desses novos métodos na obtenção de furação e de roscas em chapas finas em substituição à furação convencional e de aplicações com porca soldada, porca insertada, estampagem/rosqueamento e furação convencional com uso de parafuso com rosca soberba.

ABSTRACT

The dissertation concerns about two manufacturing processes. The flowdrilling, used to make holes in thin metal plates without chips, and also the flowtapping where internal threads are made with a tap without cutting edges that has it's work face in a polygonal form.

In flowdrilling the influence of the process variables and parameters - rotation, feed, sheet thickness, diameter and kind of tool - over the process' characteristics and the final quality of the holes is analised.

In flowtapping the torque is mesured and analised for different process variables and offerwards the resistence, hardness and shape of the threads are studied and it's results are compared with the conventional tapping process.

For the flowdrilling process the necessity of high speeds to generate heat at the work region was observed. At the beginning of the process and specially in ticker sheets high axial forces were achieved.

About the flowtapping was noticed that the torques, the resistance of the formed threads and also the fillets achieved higher values compared to the convencional process of tapping by cutting and this values were also higher than the ones given the standartzations.

The final results show that it's possible to use the process to obtain holes and threads in thin plates and replace conventional process lidte weld nut, inserted nuts, punching/tapping and conventional drilling with special screws.

SUMÁRIO

RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
SIMBOLOGIA	XXIV
1. INTRODUÇÃO	1
2. ESTADO DA ARTE	3
2.1. HISTÓRICO DO PROCESSO DE FURAÇÃO POR ESCOAMENTO	3
2.2. PROCESSOS CONVENCIONAIS DE FURAÇÃO EM CHAPAS FINAS	4
2.2.1. FURAÇÃO COM BROCAS HELICOIDAIS	4
2.2.2. OBTENÇÃO DE FUROS POR ESTAMPAGEM	7
2.2.3. OBTENÇÃO DE FUROS POR CORTE TÉRMICO	8
2.3. FIXAÇÕES ROSQUEADAS EM CHAPAS FINAS	9
2.4. FURAÇÃO POR ESCOAMENTO	11
2.5. CINEMÁTICA DO PROCESSO DE FURAÇÃO POR ESCOAMENTO	13
2.6. FERRAMENTAS, EQUIPAMENTOS E LUBRIFICANTES	15
2.6.1. FERRAMENTAS DE FURAÇÃO POR ESCOAMENTO	15
2.6.2. TIPOS DE FERRAMENTAS	16
2.6.3. MANDRIL	19
2.6.4. LUBRIFICANTE	20
2.7. CUIDADOS NO PROCESSO DE FURAÇÃO POR ESCOAMENTO	20
2.8. FUNDAMENTAÇÃO TECNOLÓGICA DA FURAÇÃO POR ESCOAMEN- TO	22
2.8.1. CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO	23
- <i>Força de avanço</i>	23
- <i>Momento Torçor</i>	23
- <i>Temperatura no processo de furação por escoamento</i>	24
- <i>Deslocamento do material</i>	26

2.8.2. RESULTADOS DE TRABALHO	27
- <i>Dimensões da bucha</i>	27
- <i>Vida da ferramenta</i>	29
- <i>Resistência de buchas escoadas em chapas sobrepostas</i>	30
2.9. MATERIAIS UTILIZÁVEIS	31
2.10. SUGESTÕES PARA UMA MAIOR PRODUTIVIDADE DO PROCESSO ..	32
2.11. APLICAÇÕES	33
2.12. HISTÓRICO - ROSQUEAMENTO POR CONFORMAÇÃO	37
2.13. CINEMÁTICA DO PROCESSO DE ROSQUEAMENTO POR CON- FORMAÇÃO	40
2.14. FUNDAMENTAÇÃO TECNOLÓGICA DO ROSQUEAMENTO POR CONFORMAÇÃO	42
2.14.1. VARIÁVEIS DE ENTRADA	42
- <i>Velocidade de conformação</i>	42
2.14.2. PARÂMETROS DE ENTRADA	43
- <i>Lubrificação</i>	43
2.14.3. CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO	44
- <i>Momentos torçores durante o processo</i>	44
- <i>Gráfico do Momento Torçor no rosqueamento</i>	45
- <i>Formação do filete de rosca</i>	47
- <i>Escareamento dos furos</i>	48
2.14.4. RESULTADOS DE TRABALHO	48
- <i>Dimensão do furo</i>	48
- <i>Resistências das roscas</i>	49
- <i>Precisão das roscas produzidas por deformação plástica</i>	49
- <i>Vida da ferramenta de rosqueamento por conformação</i>	50
2.15. ROSQUEAMENTO POR CONFORMAÇÃO EM BUCHAS FURADAS POR ESCOAMENTO	51
3. OBJETIVOS DO TRABALHO	54

	X
4.PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	56
4.1. INFRAESTRUTURA DE EXPERIMENTAÇÃO.	56
4.1.1. MÁQUINA-FERRAMENTA	56
4.1.2. PLATAFORMA PIEZELÉTRICA	56
4.1.3. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	58
4.1.4. CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS DE PROVA	60✓
4.1.5. DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	61
4.1.6. FERRAMENTAS UTILIZADAS	61
4.1.7. LUBRIFICANTES UTILIZADOS	62
4.1.8. SISTEMAS DE FIXAÇÃO DAS FERRAMENTAS	62
4.2. PARÂMETROS E VARIÁVEIS DE ENTRADA UTILIZADAS PARA CADA ENSAIO REALIZADO	64
4.2.1. DETERMINAÇÃO DAS FASES DO PROCESSO DE FURAÇÃO POR ESCOAMENTO	64
4.2.2. ESTUDO DA FURAÇÃO POR ESCOAMENTO COM FERRA- MENTA LONGA	66
4.2.3. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS NA FURAÇÃO POR ES- COAMENTO UTILIZANDO DIVERSOS TIPOS DE FERRA- MENTA	68
4.2.4. FURAÇÃO POR ESCOAMENTO UTILIZANDO OUTROS MATERIAIS	70
4.3. CLASSIFICAÇÃO DAS REBARBAS INFERIORES	72
4.4. ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO E DOS RESULTA- DOS DE TRABALHO	73

5. ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO E DOS RESULTADOS DE TRABALHO	74
5.1. ESTUDO DAS FASES DO PROCESSO DE FURAÇÃO POR ESCOAMENTO E DA INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DO FURO NO CORPO DE PROVA NOS RESULTADOS DOS ENSAIOS	74
5.1.1. AS FASES DO PROCESSO DE FURAÇÃO POR ESCOAMENTO	74
- 1ª Fase - Fase inicial.	74
- 2ª Fase - Fase de escoamento.	75
- 3ª Fase - Fase de acabamento	75
5.1.2. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DO FURO NO CORPO DE PROVA SOBRE AS FORÇAS DE AVANÇO E MOMENTO TORÇORES ENVOLVIDOS	77
- Comportamento da Força de avanço (F_{f1}) com a mudança da posição do furo na chapa.	77
- Comportamento do Momento Torçor (M_t) com a mudança da posição do furo na chapa.	79
5.2. INFLUÊNCIA DAS GRANDEZAS DE ENTRADA SOBRE OS CARACTERÍSTICAS DO TRABALHO E SOBRE OS RESULTADOS DE TRABALHO - FERRAMENTA LONGA	80
5.2.1. DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO A SEREM ESTUDADAS (FORÇAS ENVOLVIDAS)	80
5.2.2. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS FORÇAS DE AVANÇO DURANTE O PROCESSO	81
5.2.3. ANÁLISE DA FORÇA DE AVANÇO (F_{f1}) NO PONTO INICIAL DO ESCOAMENTO	82
- Influência do avanço (f) sobre a força de avanço (F_{f1})	82
- Influência da rotação (n) sobre a força de avanço (F_{f1})	83
- Influência do avanço sobre o ponto de ocorrência da força de avanço (F_{f1})	84
- Posição relativa da ocorrência de F_{f1} na chapa	84
- Influência da rotação sobre a posição de ocorrência da força	

	<i>de avanço Ff1</i>	86
5.2.4.	ANÁLISE DA FORÇA DE AVANÇO (Ff2) NO PONTO NO FINAL DA FASE DE ESCOAMENTO	87
	- <i>Influência do avanço sobre a força de avanço (Ff2)</i>	87
	- <i>Influência da rotação sobre a força de avanço (Ff2)</i>	88
	- <i>Influência do avanço (f) sobre a posição de ocorrência de (Ff2)</i>	88
	- <i>Influência da rotação (n) sobre o ponto de ocorrência de (Ff2)</i>	90
5.2.5.	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS MOMENTOS TORÇORES DURANTE O PROCESSO	91
5.2.6.	ANÁLISE DO MOMENTO TORÇOR MÁXIMO (Mt) DURANTE A FASE DE ESCOAMENTO	92
	- <i>Influência do avanço (f) sobre o momento torçor (Mt)</i>	92
	- <i>Influência da rotação (n) sobre o momento torçor (Mt)</i>	93
	- <i>Influência da rotação (n) e do avanço (f) sobre a posição de ocorrência do momento torçor (Mt)</i>	94
5.2.7.	ANÁLISE DA QUALIDADE DAS REBARBAS DOS FUROS ...	96
	- <i>Influência da rotação (n) e da espessura da chapa (e) sobre a qualidade da rebarba formada na furação por escoamento</i>	96
	- <i>Influência do avanço (f) e da espessura da chapa (e) sobre a qualidade das rebarbas produzidas por furação por escoamento</i>	98
5.3.	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA FURAÇÃO POR ESCOAMENTO .	100
5.3.1.	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS NA FURAÇÃO POR ESCOAMENTO UTILIZANDO DIVERSOS TIPOS DE FERRAMENTA	100
	- <i>Análise do força de avanço durante o processo de furação por escoamento para as ferramentas curtas</i>	100
	- <i>Análise da força de avanço (Ff1) no início da fase de escoamento para diversas tipos de ferramenta</i>	102
	- <i>Análise da força de avanço (Ff2) no final da fase de escoamento</i>	

<i>mento para diversas tipos de ferramenta</i>	103
- <i>Análise do momento torçor durante o processo de furação por escoamento para diferentes ferramentas</i>	104
- <i>Análise da momento torçor (Mt) máximo durante a fase de escoamento para diversos tipos de ferramenta</i>	105
- <i>Qualidade das rebarbas</i>	106
- <i>Outros parâmetros</i>	107
5.3.2. FURAÇÃO POR ESCOAMENTO UTILIZANDO OUTROS	
MATERIAIS	108
- <i>Análise do gráfico de força de avanço durante o processo para o cobre, alumínio e aço 1020</i>	108
- <i>Comparação da força de avanço (Ff1) no início da fase de escoamento para cobre, alumínio e aço 1020</i>	110
- <i>Comparação da força de avanço (Ff2) no final da fase de escoamento para cobre, alumínio e aço 1020</i>	111
- <i>Análise do gráfico de momento torçor durante o processo para o cobre, alumínio e aço 1020</i>	112
- <i>Comparação do Momento Torçor (Mt) máximo durante a fase de escoamento para cobre, alumínio e aço 1020.</i>	113
- <i>Análise do gráfico de força de avanço durante o processo para o aço inoxidável e aço 1020</i>	114
- <i>Comparação da Força de Avanço (Ff1) no início da fase de escoamento para o aço inoxidável e aço 1020.</i>	115
- <i>Comparação da Força de Avanço (Ff2) no final da fase de escoamento para o aço inoxidável e aço 1020</i>	116
- <i>Análise do gráfico do momento torçor (Mt) durante o processo para aço inoxidável e aço 1020</i>	117
- <i>Comparação do Momento Torçor (Mt) máximo na fase de escoamento para aço inoxidável e aço 1020</i>	118
- <i>Qualidade das rebarbas formadas pelo processo de furação por escoamento.</i>	119
- <i>Outros parâmetros</i>	121

5.3.3. FURAÇÃO DE CHAPAS DUPLAS UTILIZANDO O PROCESSO DE FURAÇÃO POR ESCOAMENTO	122
- <i>Comportamento da Força de Avanço (Ff1)</i>	122
- <i>Comportamento do Momento Torçor (Mt) máximo durante a fase de escoamento</i>	123
5.3.4. FORÇA DE AVANÇO (Ff1) E MOMENTO TORÇOR (Mt) DO PROCESSO DE FURAÇÃO POR ESCOAMENTO VARIANDO-SE A ESPESSURA DA CHAPA	125
5.4. FURAÇÃO POR ESCOAMENTO UTILIZANDO FORÇA DE AVANÇO CONSTANTE	128
- <i>Comportamento da força de avanço durante a furação por escoamento com força de avanço constante</i>	129
- <i>Comportamento do momento torçor (Mt) durante a furação com força de avanço constante.</i>	130
- <i>Análise da força de avanço média (Ffméd) e momento torçor máximo (Mtmáx) na furação por escoamento com força de avanço constante</i>	131
- <i>Influência da espessura da chapa no tempo total de processo para furos com força de avanço constante</i>	132
- <i>Influência da rotação no tempo total de processo para furos com força aplicada constante.</i>	133
- <i>Influência da força de avanço média (Ffméd) e do momento torçor máximo (Mtmáx) na furação por escoamento com força de avanço constante em outros materiais</i> ..	134
- <i>Influência do tipo de material no tempo total de processo na furação por escoamento utilizando força de avanço constante</i>	135
5.5. FURAÇÃO POR ESCOAMENTO COM AVANÇO MANUAL	136
5.6. DIMENSÕES DA BUCHA ESCOADA	138
- <i>Diâmetro médio</i>	139
- <i>Circularidade</i>	140
- <i>Cilindricidade</i>	141

- <i>Rugosidade</i>	142
- <i>Diâmetro externo inferior e altura da bucha</i>	144
5.7. ANÁLISE DA TEMPERATURA DA PEÇA DURANTE A FURAÇÃO POR ESCOAMENTO E DE OUTROS PARÂMETROS DE ENTRADA E CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO	146
5.7.1. MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DURANTE A FURAÇÃO POR ESCOAMENTO	146
5.7.2. ANÁLISE METALOGRÁFICA DAS BUCHAS FORMADAS POR ESCOAMENTO E TAMBÉM POSTERIORMENTE ROSCADAS	149
5.7.3. ANÁLISE METALOGRÁFICA DA FERRAMENTA DE FURAÇÃO POR ESCOAMENTO	150
5.7.4. ANÁLISE DO DESGASTE DA FERRAMENTA E DAS INCRUSTAÇÕES CAUSADAS PELO PROCESSO	152
5.7.5. ANÁLISE DO LUBRIFICANTE UTILIZADO	153
5.8. ROSQUEAMENTO POR CONFORMAÇÃO EM FUROS ESCOADOS	154
5.8.1. ANÁLISE DO MOMENTO TORÇOR NO ROSQUEAMENTO POR CONFORMAÇÃO	154
- <i>Gráfico do momento torçor no rosqueamento por conformação em furos escoados</i>	154
- <i>Momento torçor máximo durante o rosqueamento</i>	155
- <i>Momento torçor máximo no retrocesso do macho</i>	156
5.8.2. RESISTÊNCIA DAS ROSCAS FORMADAS POR CONFORMAÇÃO E POR MACHOS DE USINAGEM	158
6. CONCLUSÕES	163
7.SUGESTÕES PARA A CONTINUIDADE DO TRABALHO	167

BIBLIOGRAFIA	171
APÊNDICE A - MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	177
APÊNDICE B - COMPOSIÇÃO QUÍMICA / CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS	183
APÊNDICE C - TABELAS PARA ANÁLISE DE DADOS	187
APÊNDICE D - AFERIÇÃO DA FURADEIRA RADIAL	188
APÊNDICE E - PROGRAMA DE AQUISIÇÕES DE DADOS SADA - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	190

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 - Furação por escoamento	3
Figura 2.2 - Formação de cavaco na furação de chapas finas com brocas helicoidais	5
Figura 2.3 - Furo executado por broca helicoidal	5
Figura 2.4 - Comportamento das forças na furação de chapas finas com brocas helicoidais	6
Figura 2.5 - Processo de estampagem de furos em chapas	7
Figura 2.6 - Processo de formação do furo na estampagem	7
Figura 2.7 - Unidade de laser com múltiplas estações de trabalho.	8
Figura 2.8 - Fixação rosqueada em chapa com parafuso de rosca soberba	9
Figura 2.9 - União com porca soldada	9
Figura 2.10 - Uniões com porca insertada e com rebite	10
Figura 2.11 - Processos de furação para posterior rosqueamento em perfis	10
Figura 2.12 - Princípio do processo de furação por escoamento	11
Figura 2.13 - Forma do furo escoado	12
Figura 2.14 - Rosqueamento em bucha furada por escoamento	12
Figura 2.15 - Deslocamento da ponta da ferramenta (S_v) em função do tempo (t) para uma força de avanço constante (F_p)	13
Figura 2.16 - Ferramenta de furação por escoamento	15
Figura 2.17 - Forma das ferramentas de furação por escoamento	16
Figura 2.18 - Tipos de ferramentas de furação por escoamento	18
Figura 2.19 - Mandril com pinça especial para o processo de furação por escoamento	19
Figura 2.20 - Momento torçor (M_t) em função da força de avanço constante durante o processo (F_p) e rotação (n)	23
Figura 2.21 - Esquema de medição da temperatura na furação por escoamento utilizando um pirômetro infravermelho	25
Figura 2.22 - Levantamento da curva de temperatura em dois pontos do corpo de prova	25
Figura 2.23 - Esquema de posicionamento de termopares utilizado na medição de temperatura na furação por escoamento	26

Figura 2.24 - Deslocamento esquemático do material no processo de furação por escoamento	27
Figura 2.25 - Dimensões principais da bucha escoada	27
Figura 2.26 - Diâmetro da bucha em função da força de avanço constante (F_p) para diferentes espessuras de chapas e rotações (n)	28
Figura 2.27 - Altura da bucha em função da força de avanço constante (F_p) para diferentes espessuras de chapas (s) e rotações (n)	28
Figura 2.28 - Vida provável de ferramentas de furação por escoamento	29
Figura 2.29 - Ensaio de força de tração	30
Figura 2.30 - Ensaio de força cisalhante	30
Figura 2.31 - Distribuidor de gás - Uma das primeiras peças a serem fabricadas industrialmente pela furação por escoamento	33
Figura 2.32 - Máquina automática para furação por escoamento	34
Figura 2.33 - Conexão prensada e pode ser soldada	35
Figura 2.34 - Conexão com vedação	35
Figura 2.35 - Vedação O-Ring em perfis furados por escoamento	36
Figura 2.36 - Superfície de apoio ou assento para apoios planos	36
Figura 2.37 - Conexão com parafuso em bucha escoada com colar	36
Figura 2.38 - Conexão com parafuso em bucha escoada escareada	36
Figura 2.39 - Macho de conformação com sulcos	38
Figura 2.40 - Macho de conformação com três lóbulos	38
Figura 2.41 - Machos de conformação <i>Polygon</i>	38
Figura 2.42 - Forma do macho de conformação atual	40
Figura 2.43 - Formação dos filetes no rosqueamento por conformação	41
Figura 2.44 - Experimentos de Momento torçor para diversos materiais	44
Figura 2.45 - Gráfico de Momento Torçor no rosqueamento	46
Figura 2.46 - Fibras mecânicas do filete conformado e do filete usinado	47
Figura 2.47 - Garra formada no filete conformado	47
Figura 2.48 - Buchas furadas por escoamento e que posteriormente foram roscadas por conformação	51
Figura 2.49 - Momentos torçores no rosqueamento em chapas furadas por escoamento	52
Figura 2.50 - Largura (K_b) e altura (K_t) da garra	53

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 - Esquema de calibração do sistema de medição de forças	57
Figura 4.2. Esquema de montagem do experimento I	58
Figura 4.3 - Esquema de montagem do experimento II	59
Figura 4.4 - Dimensões dos corpos de prova	60
Figura 4.5 - Dispositivo de fixação dos corpos de prova	61
Figura 4.6 - Mandril convencional	62
Figura 4.7 - Mandril especial para fixação da ferramenta	63
Figura 4.8 - Mandril especial para fixação dos machos de rosqueamento	63
Figura 4.9 - Ferramenta curta	64
Figura 4.10 - Ferramenta curta com escareador	64
Figura 4.11 - Ferramenta longa	66
Figura 4.12 - Ferramenta curta	68
Figura 4.13 - Ferramenta curta com escareador	68
Figura 4.14 - Ferramenta longa	68
Figura 4.15 - Ferramenta longa	70
Figura 4.16 - Critério visual de determinação da qualidade da bucha escoada	72
Figura 4.17 - Força de avanço no início do escoamento (F_{f1}) em função da varia- ção da espessura da chapa (e) e do avanço (f)	73

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 - Fases do processo de furação por escoamento	75
Figura 5.2 - Força de Avanço (F_{f1}) x Posição do furo	78
Figura 5.3 - Corpo de prova ideal	78
Figura 5.4 - Momento Torçor (M_t) x posição do furo	79
Figura 5.5 - Gráficos de Força de avanço - Ferramenta longa	81
Figura 5.6 - Força de avanço (F_{f1}) x avanço (f)	82
Figura 5.7 - Força de avanço (F_{f1}) x rotação (n)	83
Figura 5.8 - Posição de ocorrência de F_{f1} x avanço (f)	84
Figura 5.9 - Posição relativa da ocorrência de (F_{f1}) na chapa	85
Figura 5.10 - Fenômeno do amassamento	85

Figura 5.11 - Posição de ocorrência de (Ff1) x rotação (n)	86
Figura 5.12 - Força de avanço (Ff2) x avanço (f)	87
Figura 5.13 - Força de avanço (Ff2) x rotação (n)	88
Figura 5.14 - Posição de ocorrência de (Ff2) x avanço (f)	89
Figura 5.15 - Posição da ocorrência de (Ff2) x rotação (n)	90
Figura 5.16 - Gráfico de momento torçor - Ferramenta longa	91
Figura 5.17 - Momento torçor (Mt) x avanço (f)	92
Figura 5.18 - Comportamento do Momento torçor (Mt) em função da rotação (n) da ferramenta	93
Figura 5.19 - Posição de ocorrência de (Mt) x avanço (f)	95
Figura 5.20 - Posição de ocorrência de (Mt) x rotação (n)	95
Figura 5.21 - Gráfico da força de avanço (Ff) - Diversas ferramentas	101
Figura 5.22 - Força de avanço (Ff1) x avanço (f) - Diferentes ferramentas	102
Figura 5.23 - Força de avanço (Ff2) x avanço (f) - Diferentes ferramentas	103
Figura 5.24 - Gráfico de momento torçor (Mt) - Diferentes ferramentas	104
Figura 5.25 - Momento torçor (Mt) x avanço (f) - Diferentes ferramentas	105
Figura 5.26 - Gráfico da força de avanço (Ff) - Cobre - Alumínio - Aço 1020	109
Figura 5.27 - Força de avanço (Ff1) x avanço (f) - Cobre - Alumínio - Aço 1020	110
Figura 5.28 - Força de avanço (Ff2) x avanço (f) - Cobre - Alumínio - Aço 1020	111
Figura 5.29 - Gráfico do momento torçor (Mt) - Cobre - Alumínio - Aço 1020	112
Figura 5.30 - Momento torçor (Mt) x avanço (f) - Cobre - Alumínio - Aço 1020	113
Figura 5.31 - Gráfico da força de avanço (Ff) - Aço inoxidável - Aço 1020	114
Figura 5.32 - Força de avanço (Ff1) x Avanço (f) - Aço inoxidável - Aço 1020	115
Figura 5.33 - Força de avanço (Ff2) x avanço (f) - Aço inoxidável - Aço 1020	116
Figura 5.34 - Gráfico do momento torçor (Mt) - Aço inoxidável - Aço 1020	117
Figura 5.35 - Momento torçor (Mt) x avanço (f) - Aço inoxidável - Aço 1020	118
Figura 5.36 - Qualidade das Rebarbas - Alumínio	119
Figura 5.37 - Qualidade das rebarbas - Cobre	120
Figura 5.38 - Qualidade das rebarbas - Aço inoxidável	121
Figura 5.39 - Força de avanço (Ff1) - chapas duplas	123

Figura 5.40 - Momento torçor (M_t) - chapas duplas	124
Figura 5.41 - Fenômeno do empurramento	124
Figura 5.42 - Amplitudes de força de avanço (F_{f1}) e momento torçor (M_t) - Furação por escoamento	126
Figura 5.43 - Ferramenta após o término da furação por escoamento	126
Figura 5.44 - Processo de furação por escoamento durante a realização de um ensaio em chapa de 8,2 mm	127
Figura 5.45 - Foto do experimento com força de avanço constante	128
Figura 5.46 - Força de avanço (F_f) - força aplicada constante	130
Figura 5.47 - Momento torçor (M_t) - força aplicada constante	130
Figura 5.48 - Força de avanço média ($F_{fméd}$) e momento torçor máximo ($M_{tmáx}$) força de avanço constante	131
Figura 5.49 - Tempo total (t) x espessura da chapa (e) - Força aplicada constante	132
Figura 5.50 - Tempo total (t) x rotação - Furação com força de avanço constante	133
Figura 5.51 - Força de avanço média ($F_{fméd}$) e momento torçor máximo ($M_{tmáx}$) - Furação com força de avanço constante	134
Figura 5.52 - Tempo total (t) x tipo de material - Furação com força de avanço constante	135
Figura 5.53 - Força de avanço e momento torçor para furação por escoamento com avanço manuais.	137
Figura 5.54 - Diâmetro médio em função do avanço para diversas espessuras e rotações	139
Figura 5.55 - Erro de circularidade em função do avanço para diversas espessuras e rotações	140
Figura 5.56 - Medição do erro de circularidade em um furo escoado	141
Figura 5.57 - Erro de cilindricidade em função do avanço para diversas espessuras e rotações	142
Figura 5.58 - Rugosidade (R_a) em função do avanço para diversas espessuras e rotações	143
Figura 5.59 - Rugosidade (R_t) em função do avanço para diversas espessuras e rotações	143

Figura 5.60 - Altura e diâmetro externo inferior da bucha escoada	144
Figura 5.61 - Diâmetro externo inferior (d) x avanço (f)	145
Figura 5.62 - Altura da bucha (h) x avanço (f)	145
Figura 5.63 - Esquema de montagem do experimento para medição de temperatura durante o processo de furação por escoamento	146
Figura 5.64 - Estrutura metalográfica do furo escoado	149
Figura 5.65 - Garra no filete conformado	150
Figura 5.66 - Metalografia do metal duro da ferramenta de furação por escoamen- to	151
Figura 5.67 - Desgaste na ferramenta de furação por escoamento	152
Figura 5.68 - Momento torçor no rosqueamento por conformação em furos esco- dos	155
Figura 5.69 - Momento torçor máximo no rosqueamento - macho de conformação x macho de usinagem	156
Figura 5.70 - Momento torçor máximo no retrocesso do rosqueamento - macho de conformação x macho de usinagem	157
Figura 5.71 - Machos de conformação - Momento torçor máximo	157
Figura 5.72 - Dispositivo de ensaio de tração em furos escoados roscados	158
Figura 5.73 - Resultados de ensaios de resistência a tração das roscas	160
Figura 5.74 - Resultados dos ensaios de resistência a tração com cargas progressi- vas	161

CAPÍTULO 6

Figura 6.1 - Parafuso EJOT	168
Figura 6.3 - Dispositivo Fz	169
Figura 6.2 - Dispositivo Fa	169

ADENDOS

Apêndice E - SADA - Sistema de Aquisição de Dados	190
Apêndice E - Análise de dados - SADA	191
Apêndice E - Produção de gráficos - SADA	192

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 - Torques requeridos no rosqueamento por conformação e no rosqueamento convencional para 75% do filete formado.	45
---	----

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 - Variáveis de entrada utilizadas	65
Tabela 4.2 - Variáveis de entrada utilizadas	67
Tabela 4.3 - Variáveis de entrada utilizadas - outras ferramentas	69
Tabela 4.4 - Espessura da chapa - outros materiais.	70
Tabela 4.5 - Variáveis de entrada utilizadas - outros materiais	70
Tabela 4.6 - Condutividade térmica dos materiais utilizados	71

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1 - Qualidade das rebarbas - rotação (n) x espessura da chapa (e)	96
Tabela 5.2 - Qualidade das rebarbas - avanço (f) x espessura da chapa (e)	98
Tabela 5.4 - Qualidade das rebarbas - ferramenta curta	106
Tabela 5.5 - Qualidade das rebarbas - ferramenta curta com escareador	107
Tabela 5.6 - Temperatura durante a furação por escoamento	147

SIMBOLOGIA

Vc	-	velocidade de corte (m/min)
n	-	rotação (min^{-1})
f	-	avanço (mm/rot)
e	-	espessura (mm)
t	-	tempo (s)
p	-	passo da rosca (mm)
T	-	temperatura (K)
Ff	-	força de avanço (N)
Ff1	-	força de avanço no início da fase de escoamento (N)
Ff2	-	força de avanço no final da fase de escoamento (N)
Ff3	-	força de avanço máxima na fase de acabamento (N)
Mt	-	momento torçor (N.cm)
Mtmáx	-	momento torçor máximo (N.cm)
s	-	desvio padrão
t	-	coeficiente de Student
Ra	-	rugosidade - desvio médio aritmético (μm)
Rt	-	rugosidade - altura máxima das rugosidades (μm)
d	-	diâmetro do furo (mm)
D	-	diâmetro externo inferior da bucha (mm)
Kt	-	altura da garra de filetes conformados (mm)
Kb	-	largura da garra de filetes conformados (mm)
HRb	-	dureza Rockwell B

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A furação por escoamento é um processo de fabricação no qual uma ferramenta rotativa de metal duro é pressionada contra uma chapa metálica fina. O atrito na região de contato faz com que a temperatura aumente, diminuindo a resistência à deformação do material da chapa. Produz-se então o furo na chapa metálica com a deformação plástica do material. Todo o material do furo se apresenta como uma rebarba que ascende e descende na periferia do furo.

As principais vantagens do processo de furação por escoamento são inexistência da produção de cavacos, a pequena faixa de tolerância dos diâmetros dos furos e uma longa vida útil da ferramenta. Destacam-se também a maior resistência das uniões, diminuição significativa dos custos de produção e baixos custos de aquisição de ferramentas e equipamentos.

A utilização desses novos métodos se destaca principalmente na furação de perfis e chapas de vários tipos, em aplicações na indústria automobilística, de eletrodomésticos, de iluminação, de climatização, fabricação de móveis tubulares e sistemas de distribuição de gases e aquecimento.

• O rosqueamento por conformação é uma operação onde através de uma ferramenta que tem a face de trabalho na forma de um parafuso poligonal, produz-se uma rosca interna na peça por deformação plástica.

As principais vantagens desse processo estão no encruamento do material do filete, levando a maiores resistências das roscas, uma elevada precisão dimensional, menores tempos

de processo e a preservação do fibramento mecânico do material.

Este trabalho tem como objetivo estudar aspectos dos processo de furação por escoamento e rosqueamento por conformação ainda pouco abordados pela literatura, como a utilização de avanços automáticos na execução de furos por escoamento.

Além disso são realizados ensaios para mostrar as principais características apresentadas tanto pelo processo de furação por escoamento como pelo processo de rosqueamento por conformação. São utilizadas várias espessuras de chapa de aço para determinação dos resultados, bem como realizados ensaios para determinar tendências dos processos em chapas de cobre, aço inoxidável e alumínio.

São estudados dentro deste trabalho a qualidade das rebarbas produzidas pelo processo de furação por escoamento e também a resistência das roscas produzidas em furos escoados.

Outro objetivo deste trabalho é a divulgação de novas tecnologias de fabricação no país.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE

2.1. HISTÓRICO DO PROCESSO DE FURAÇÃO POR ESCOAMENTO

O processo de furação por escoamento (Flowdrilling, Fließlochformen) foi inicialmente desenvolvido na França em 1923, onde Jean Claude Vallière fez os primeiros experimentos com uma ferramenta rotativa para perfurar chapas finas de aço por escoamento com aquecimento por atrito. Porém, no início surgiram obstáculos tanto econômicos quanto tecnológicos. Aproximadamente 60 anos depois esses problemas foram solucionados pela disponibilidade de metal duro e pela otimização da geometria da ferramenta, bem como pela disponibilidade de máquinas

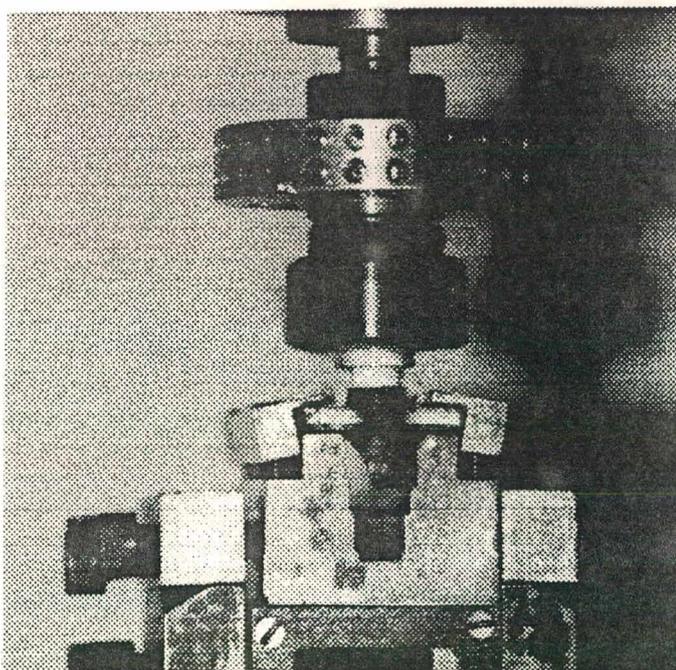


Figura 2.1 - Furação por escoamento

apropriadas para gerar a geometria complexa da ferramenta [31].

De 1972 a 1977, o holandês J. van Geffen preocupou-se com o desenvolvimento de ferramentas adequadas e utilizáveis na prática, tendo desenvolvido várias patentes holandesas até 1977. Nessa época surgiram casos de aplicação na Holanda e na Inglaterra [4].

Durante alguns anos G. Kretschmer trabalhou com J. van Geffen no desenvolvimento de dados tecnológicos para esse novíssimo processo de fabricação.

Kretschmer apresentou desde 1977, vários trabalhos sobre o assunto, e em 1980 apresentou sua tese de doutoramento com o tema " *Furação por escoamento* ". Desde então, já como professor na Universidade de Siegen na Alemanha, vem desenvolvendo estudos sobre as propriedades do processo. Não se tem informações de outros trabalhos versados sobre o assunto no mundo, publicados por outros autores.

2.2. PROCESSOS CONVENCIONAIS DE FURAÇÃO EM CHAPAS FINAS

2.2.1. FURAÇÃO COM BROCAS HELICOIDAIS

A furação em chapas finas com brocas helicoidais, quando comparada a outros métodos comuns de produção, é freqüentemente considerada como um dos mais difíceis processos de fabricação.

A figura 2.2 mostra esquematicamente a obtenção de um furo em uma chapa fina, empregando uma broca helicoidal. Nota-se que nem todo o material do furo é transformado em cavaco. Em consequência da força de avanço grande e da deformabilidade do material da chapa, parte do material do furo a executar, é empurrado no sentido do avanço, sendo destacado da chapa quando as quinas da broca atingem a borda inferior da chapa. Nesta sequência podem se formar rebarbas acentuadas na borda inferior da chapa. Segundo Shikata [1], normalmente ocor-

rem cavacos grandes nesse tipo de furação.

A figura 2.3 mostra um furo produzido em uma chapa com broca helicoidal e as correspondentes rebarbas formadas. Em muitos casos a rebarba formada tem de ser eliminada por processos posteriores, dificultando o uso produtivo do processo. Shikata [1] chegou à conclusão, em seu trabalho, que os melhores resultados em termos de rebarba estão associados a maiores velocidades de corte e avanço.

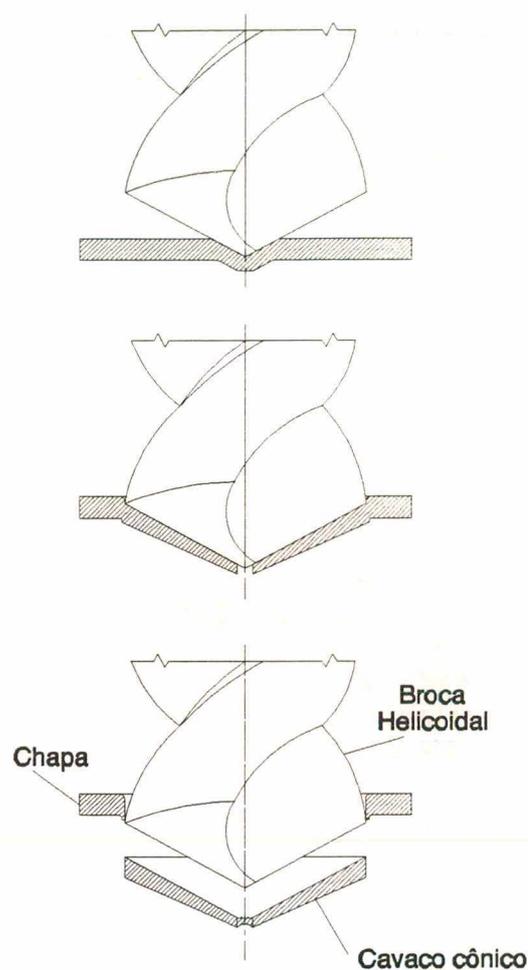


Figura 2.2 - Formação de cavaco na furação de chapas finas com brocas helicoidais

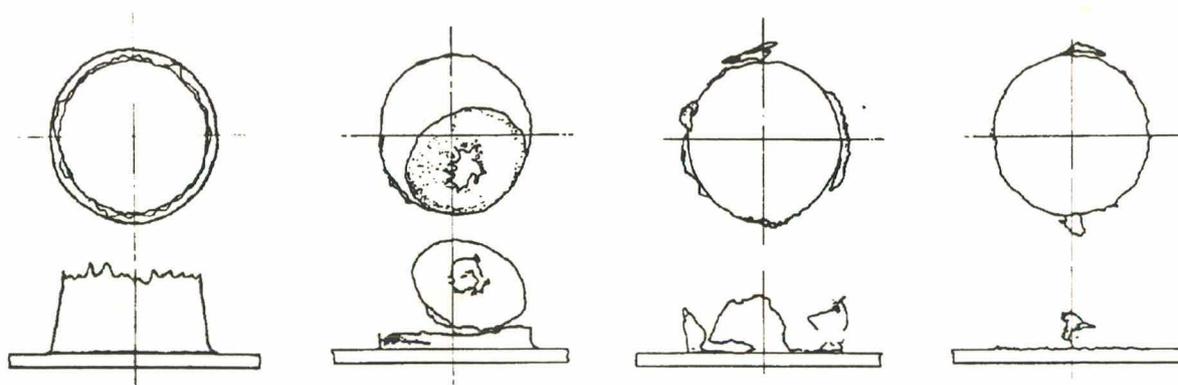


Figura 2.3 - Furo executado por broca helicoidal

A figura 2.4 mostra o comportamento da força de avanço e momento torçor durante a realização de furos com brocas helicoidais em chapas finas. Shikata [1] relata que os menores valores de pico de momento torçor ocorrem na combinação do menor valor de avanço com a maior velocidade de corte. Os valores de força de avanço decrescem ligeiramente com um incremento na velocidade, mas crescem substancialmente quando o avanço é aumentado.

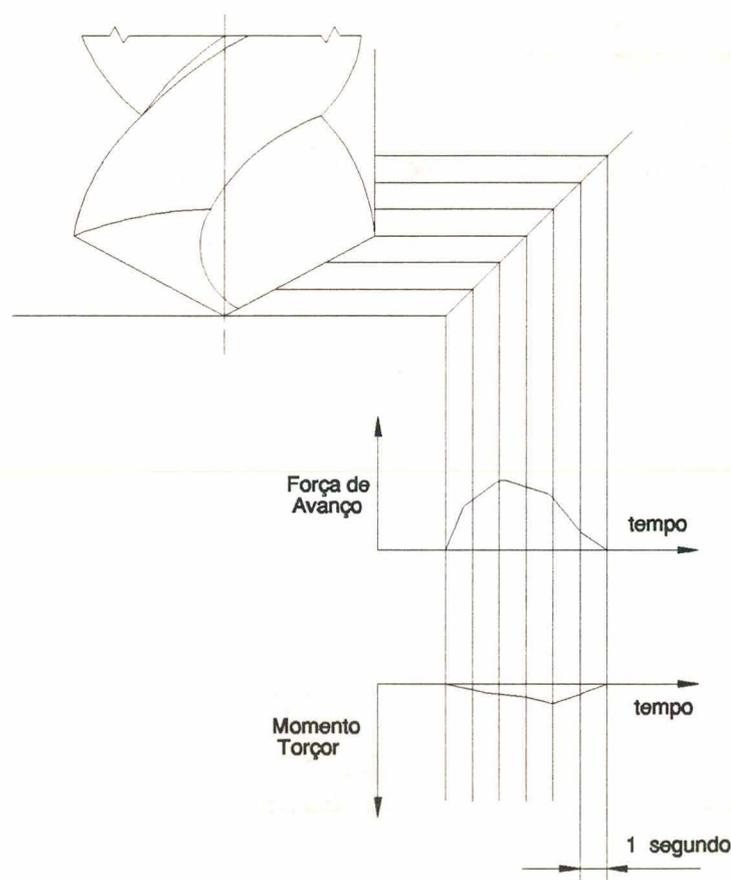


Figura 2.4 - Comportamento das forças na furação de chapas finas com brocas helicoidais

Outra importante conclusão do trabalho foi com relação à geometria da ponta da broca, especialmente o ângulo de ponta e a forma do gumes. Observou-se que esses parâmetros exercem uma importante influência nos padrões de força de corte. Notou-se que os valores máximos de força de avanço e momento torçor ocorrem quando a parte ativa do gume se encontra próxima ao diâmetro nominal da broca helicoidal com ponta cônica.

2.2.2. OBTENÇÃO DE FUROS POR ESTAMPAGEM

O processo de estampagem de furos em chapas finas é muito usado em diversos tipos de aplicações. É um processo de separação de partes adjacentes através de uma fratura controlada, empregando-se normalmente duas ferramentas com gumes afiados (fig. 2.5) [43].



Figura 2.5 - Processo de estampagem de furos em chapas

Iniciada a deformação, uma banda estreita sofre uma severa deformação plástica, até que se gerem trincas junto aos gumes das ferramentas, e há um pequeno ângulo com a direção de corte. Quando essas trincas se encontram, a ação de corte está completa. A profundidade de penetração da ferramenta é função direta da

espessura do material. A borda de uma chapa estampada não é perfeitamente perpendicular à superfície da chapa, e apresenta em geral três zonas: uma região arredondada (formada pela deformação plástica inicial, sem corte), uma zona lisa (decorrente do corte em condições hidrostáticas) e uma zona rugosa (correspondente à superfície da trinca da fratura), como mostra a fig. 2.6.

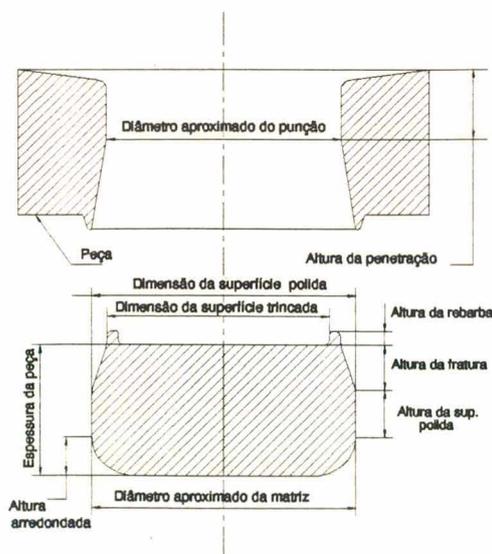


Figura 2.6 - Processo de formação do furo no estampagem

2.2.3. OBTENÇÃO DE FUROS POR CORTE TÉRMICO

Com o desenvolvimento recente do laser CO_2 , a furação e o corte de chapas tem se tornado mais frequente na indústria. Um raio laser é focalizado sobre a superfície promovendo um aquecimento. Em chapas de aço de baixo carbono, um jato de oxigênio auxilia no corte, ao passo que para materiais não oxidáveis um jato de gás inerte, normalmente o nitrogênio, se incumbe de remover o material líquido da fenda de corte. A furação a laser, associada ao posicionamento da chapa em uma mesa de coordenadas, permite elevadas velocidades de corte. A região termicamente afetada pela ação de corte se restringe a alguns centésimos de milímetro [57].

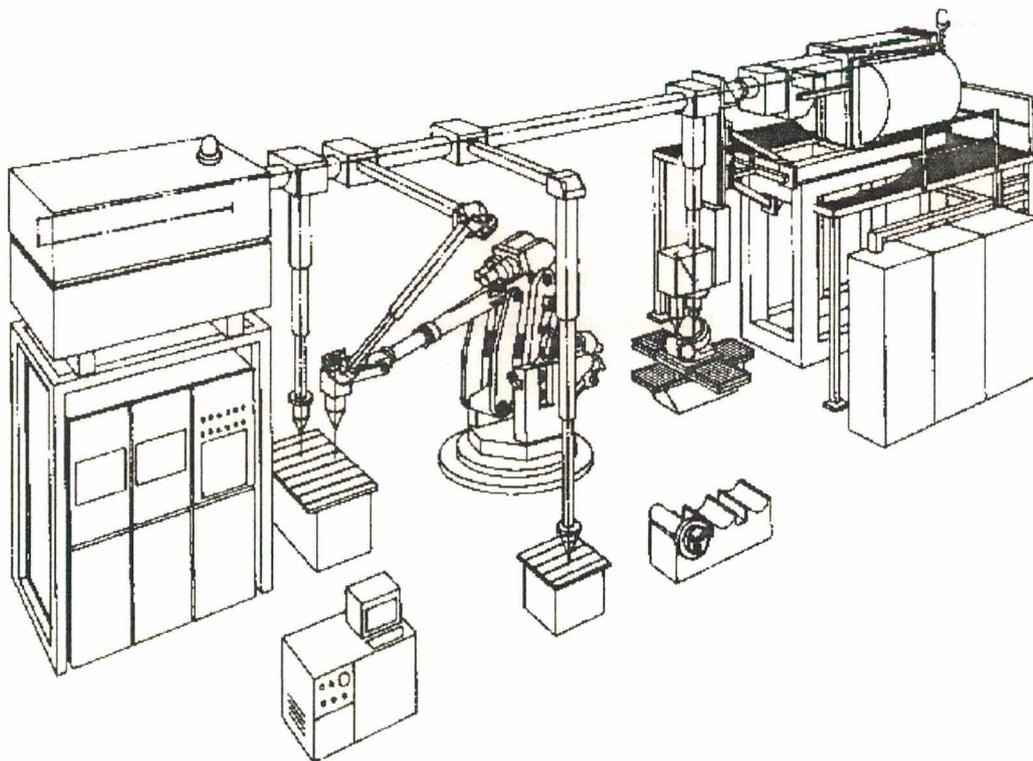


Figura 2.7 - Unidade de laser com múltiplas estações de trabalho.

2.3. FIXAÇÕES ROSQUEADAS EM CHAPAS FINAS

Fixações rosqueadas em chapas finas comumente exigem o emprego de parafusos especiais, tipo parafusos de rosca soberba (fig. 2.8), ou a utilização de parafusos com porca. A dificuldade de acesso à porca limita esta opção. A fixação com parafuso de rosca soberba deixa a desejar, pois a resistência da fixação é no máximo igual à resistência do filete da rosca no parafuso ou na chapa.

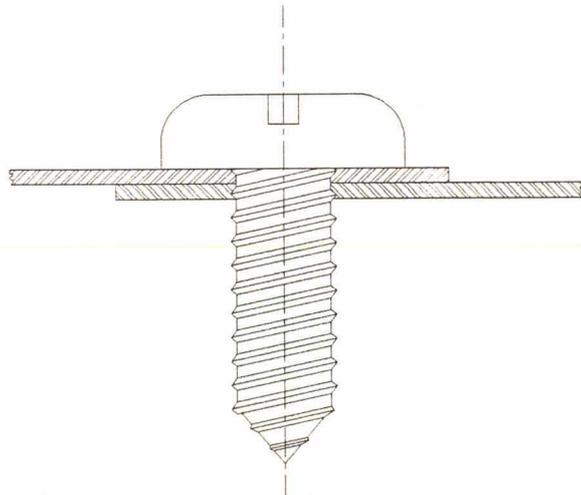


Figura 2.8 - Fixação rosqueada em chapa com parafuso de rosca soberba

Um processo de união de chapas finas comumente utilizado na indústria é a soldagem de uma porca na chapa no ponto onde se deseja realizar a união (fig. 2.9). Este processo, além de caro, para aplicações em grandes séries, exige altos investimentos na auto-

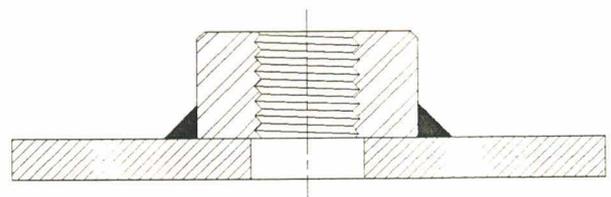
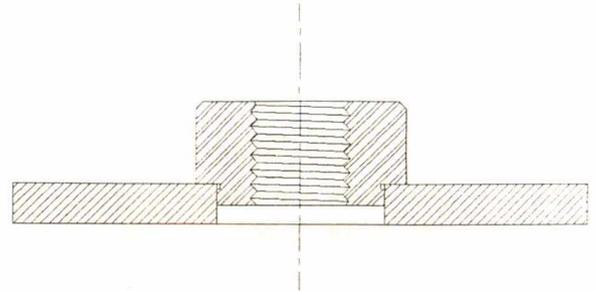


Figura 2.9 - União com porca soldada

mação das linhas de fabricação.

A utilização de porcas insertadas em furos produzidos em chapas finas tem tido diversas aplicações na indústria. Devido ao alto custo das porcas e também à necessidade prévia de um furo com boa qualidade e dimensões adequadas, o uso deste tipo de união tem sido restrito [59] (fig 2.10).



Um outro processo utilizado pela indústria para união de chapas finas é um processo de estampagem progressiva. O processo consiste na estampagem de um furo com um punção de diâmetro menor do que o diâmetro final do furo. Posteriormente uma ferramenta especial é utilizada para repuxar o furo, produzindo-se um ressalto no lado inferior. Neste ressalto é cortada uma rosca com ferramentas de rosquear convencionais (fig. 2.11).

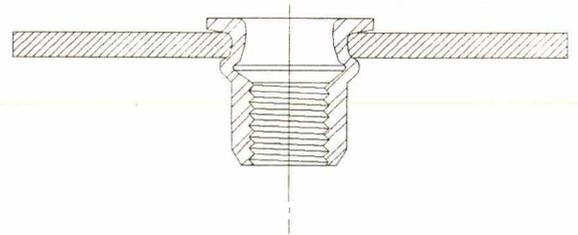


Figura 2.10 - Uniões com porca insertada e com rebite

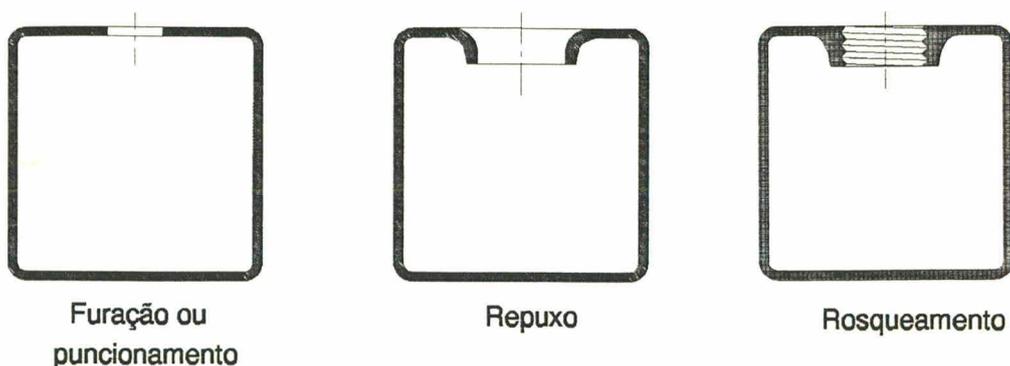


Figura 2.11 - Processos de furação para posterior rosqueamento em perfis

2.4. FURAÇÃO POR ESCOAMENTO

A fabricação de juntas removíveis em peças de paredes finas durante décadas foi executada de muitas maneiras diferentes na engenharia de fabricação. Os métodos usados por um bom tempo nas uniões em chapas finas eram a usinagem, a estampagem, a soldagem de porcas, o embutimento de porcas e outras soluções que dependiam das circunstâncias envolvidas e de sua finalidade [5].

Em alguns casos, entretanto, essas circunstâncias faziam com que as soluções adotadas não satisfizessem em termos de eficiência, de produção ou de custos.

Desde o final dos anos 70, um novo processo de fabricação denominado de furação por escoamento tem sido empregado em diversas aplicações.

Segundo Koenig [42] que define os processos de furação como sendo todos os processos com movimento rotativo principal, nos quais a ferramenta apresenta apenas um movimento de avanço, no sentido do eixo de rotação, o processo pode ser enquadrado como furação, mas por não haver retirada de cavacos, não pode ser considerado um processo de usinagem e sim um processo de conformação.

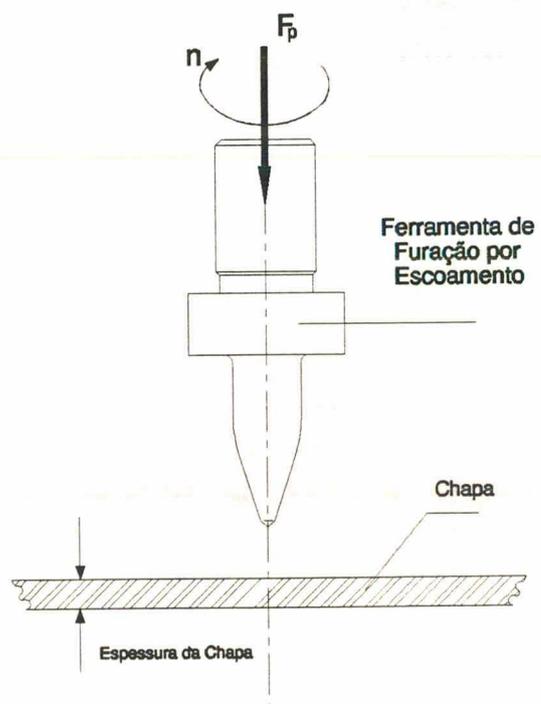


Figura 2.12 - Princípio do processo de furação por escoamento

Com este processo, uma rebarba é formada pelo escoamento do material proporcionado

pela rotação de uma ferramenta de metal duro, a qual é pressionada contra a peça. A rotação gera calor por atrito, aumentando a temperatura e diminuindo a resistência à deformação do material da chapa (fig. 2.12). A rebarba formada na parte superior da chapa pode ser usinada ou conformada pelo colar da ferramenta. Ao conjunto formado pela união da rebarba superior com a rebarba inferior se denomina bucha (fig. 2.13) [31].

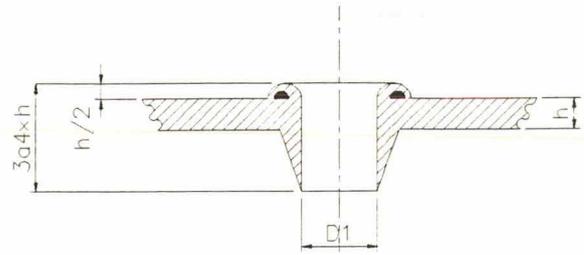


Figura 2.13 - Forma do furo escoado

Nas buchas formadas pode ser executadas roscas, tanto por métodos convencionais por usinagem, quanto por machos de conformação (fig.2.14).

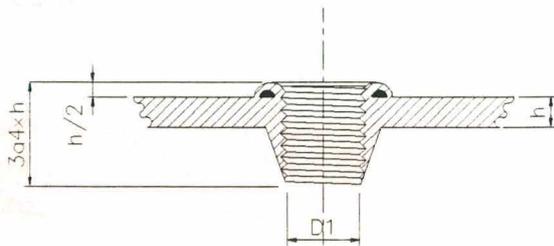


Figura 2.14 - Rosqueamento em bucha furada por escoamento

As principais vantagens desses processos são a inexistência de de cavacos, a longa vida da ferramenta, precisão elevada dos furos e o uso de velocidades altas diminuindo os tempos de processo e, conseqüentemente, os custos de produção [5].

2.5. CINEMÁTICA DO PROCESSO DE FURAÇÃO POR ESCOAMENTO

O processo de furação por escoamento pode ser desenvolvido por duas formas cinemáticas distintas. Na primeira, já descrita na literatura técnica, uma força de avanço constante atua sobre a ferramenta, de forma que a velocidade de avanço varia ao longo do tempo. Na segunda, a velocidade de avanço é fixa, e o comportamento da força é variável ao longo do processo de furação. A figura 2.15 mostra o deslocamento da ferramenta em função do tempo para uma força de avanço de 1,6 kN e uma rotação de 4300 rpm em uma chapa de 1,5 mm de espessura.

No primeira fase do percurso de avanço ($S_v = 1,5$ mm) a ferramenta com diâmetro de $D_1 = 5,54$ mm na parte cilíndrica penetra vagarosamente no material. Este percurso inicial da ferramenta é facilmente identificável pela inclinação menor da curva. Na fase inicial o material da peça é empurrado pela ferramenta na direção do avanço formando-se um colar ao redor dela.

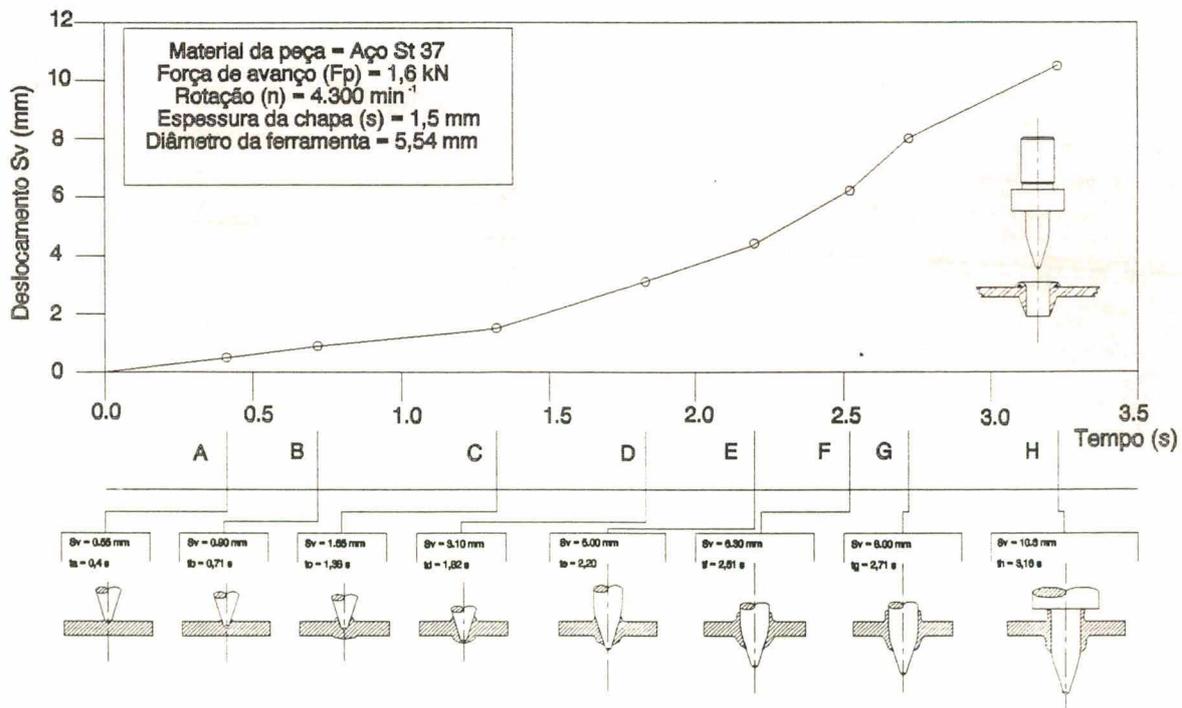


Figura 2.15 - Deslocamento da ponta da ferramenta (S_v) em função do tempo (t) para uma força de avanço constante (F_p)

Com $t_c = 1,38$ s (fig. 2.15,c) ocorre um abaulamento na parte inferior da chapa e o colar superior aumenta mais ainda. Com avanço da ferramenta tanto o colar superior quanto o abaulamento da parte inferior, continuam crescendo.

Para o $t_d = 1,82$ s, a ferramenta descreve um caminho de $S_v = 3.1$ mm e inicia a perfuração da parte inferior da chapa.

Durante a penetração da parte cônica da ferramenta na chapa, tanto o colar superior como a rebarba inferior crescem de altura e diâmetro.

Para $t_f = 2.51$ s com um percurso $S_v = 6.3$ mm observa-se que a parte cilíndrica da ferramenta terminou a conformação da parte superior da chapa, e para $t_g = 2.71$ s e $S_v = 8$ mm; a ferramenta prolonga a rebarba na direção do avanço com um simultâneo aumento do diâmetro interno.

A cinemática da furação por escoamento com avanço constante e respectivas características do processo será objetivo deste trabalho.

2.6. FERRAMENTAS, EQUIPAMENTOS E LUBRIFICANTES

2.6.1. FERRAMENTAS DE FURAÇÃO POR ESCOAMENTO

A ferramenta de furação por escoamento é fabricada em metal duro (tipo K), especialmente desenvolvida para este processo, com base de carboneto de tungstênio de alta resistência ao desgaste e a variações térmicas [2].

Atualmente existem fabricantes que apresentam ferramentas em outros materiais como o CERMET e ferramentas revestidas [15].

A ferramenta pode ser subdividida em várias partes : ponta cônica circular, cone poligonal, parte prismática poligonal, colar e haste cilíndrica (fig. 2.16).

A ponta cônica favorece o atrito da ferramenta com a peça. Logo acima da ponta encontra-se a parte cônica poligonal da ferramenta seguida da parte prismática poligonal que dá forma final ao furo. Na parte superior da ferramenta há um colar em forma de anel e a haste para fixação da ferramenta no mandril. A forma poligonal do cone e da parte cilíndrica é essencial para o funcionamento do processo de furação por escoamento [31].

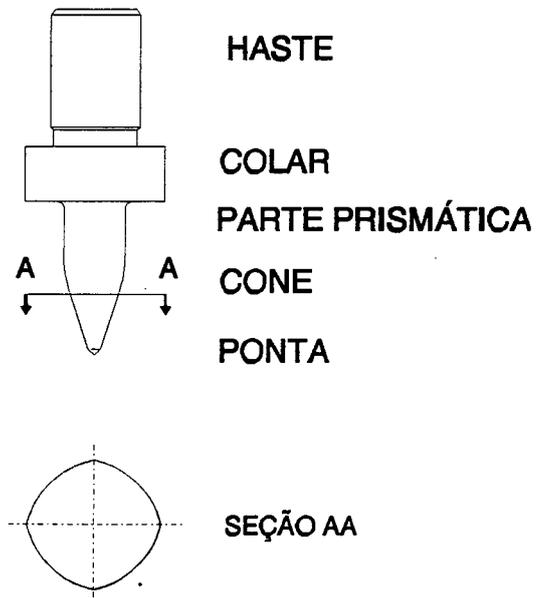


Figura 2.16 - Ferramenta de Furação por escoamento

2.6.2. TIPOS DE FERRAMENTAS

As ferramentas de furação por escoamento podem ser classificadas em 3 tipos principais, que se distinguem em relação ao comprimento do cone e da parte prismática e são descritas a seguir [31]:

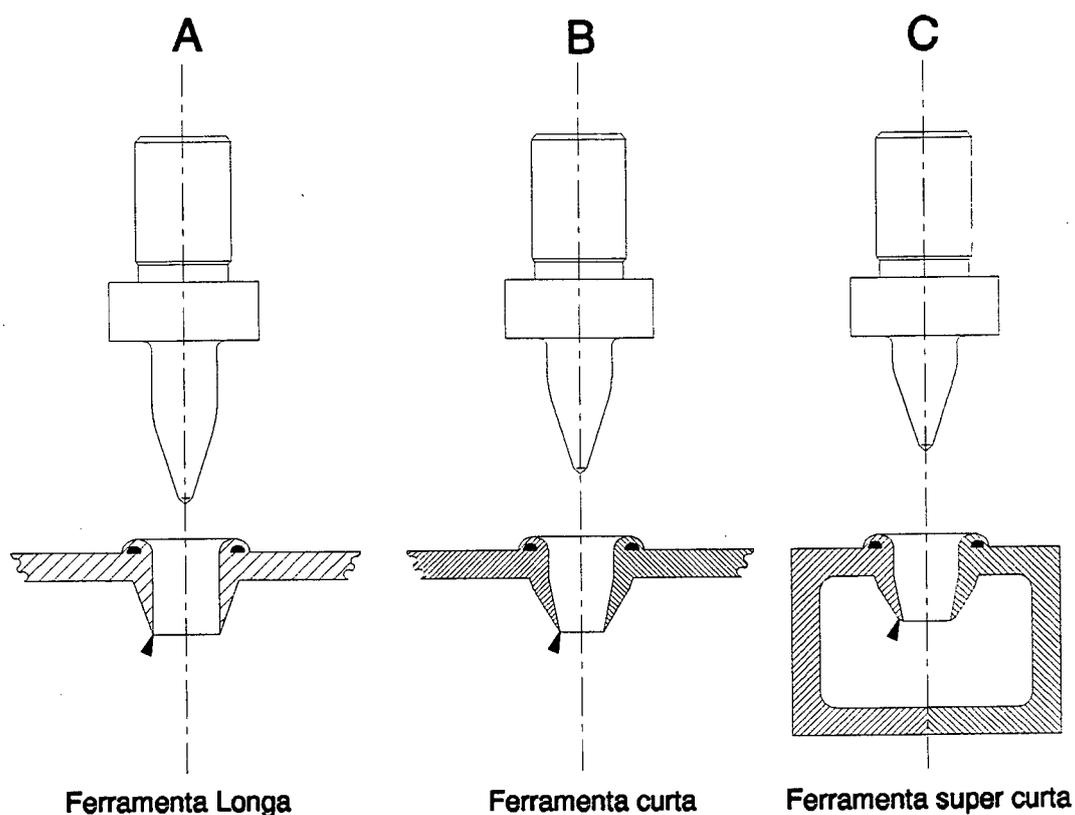


Figura 2.17 - Forma das ferramentas de furação por escoamento

- Ferramenta longa

A ferramenta longa apresenta uma parte cônica e uma parte prismática poligonal com comprimentos aproximadamente iguais. Na furação a parte cilíndrica se desloca ao longo de todo o comprimento da rebarba, de modo que a forma do furo é cilíndrico (fig. 2.17,A).

- Ferramenta curta

Este tipo foi especialmente desenvolvido para confecção de furos a serem roscados. Aqui a parte prismática poligonal é bem mais curta que na ferramenta longa. Os furos feitos com esta ferramenta são cônicos, pois a parte cilíndrica tem um comprimento menor que a altura da bucha formada na chapa. Esta conicidade do furo favorece a operação de rosqueamento por conformação (fig. 2.17,B).

A parte prismática da ferramenta deve transpassar a espessura da chapa.

- Ferramenta super curta

A ferramenta super curta foi desenvolvida para a furação de perfis ocos onde não se dispõe de altura útil suficiente para trabalhar com a ferramenta longa. Ela se diferencia das demais pelo ângulo de ponta bem maior (fig. 2.17,C).

Para cada uma destas três ferramentas podemos ter ainda distintas formas de colar, visando a conformação ou remoção da rebarba superior produzida no furo, ou ainda o trabalho em materiais peculiares, como chapas galvanizadas. As diferentes características desses colares para ferramentas de furação por escoamento são descritas abaixo.

- Ferramenta com colar conformador

O colar dessa ferramenta apresenta um formato que conforma a rebarba levando a um ótimo aspecto visual da chapa. Este tipo de ferramenta é a empregada tradicionalmente na execução dos furos (fig. 2.18,A).

- Ferramenta com escareador

Este tipo apresenta dois gumes no colar que cortam o acúmulo de rebarba na parte superior do furo. Com isso se retira o acúmulo de material no local de furação, obtendo-se uma superfície superior do furo plana. Para utilizações especiais também são fabricadas ferramentas com gumes especiais para operações de chanfros e raios (fig. 2.18,A).

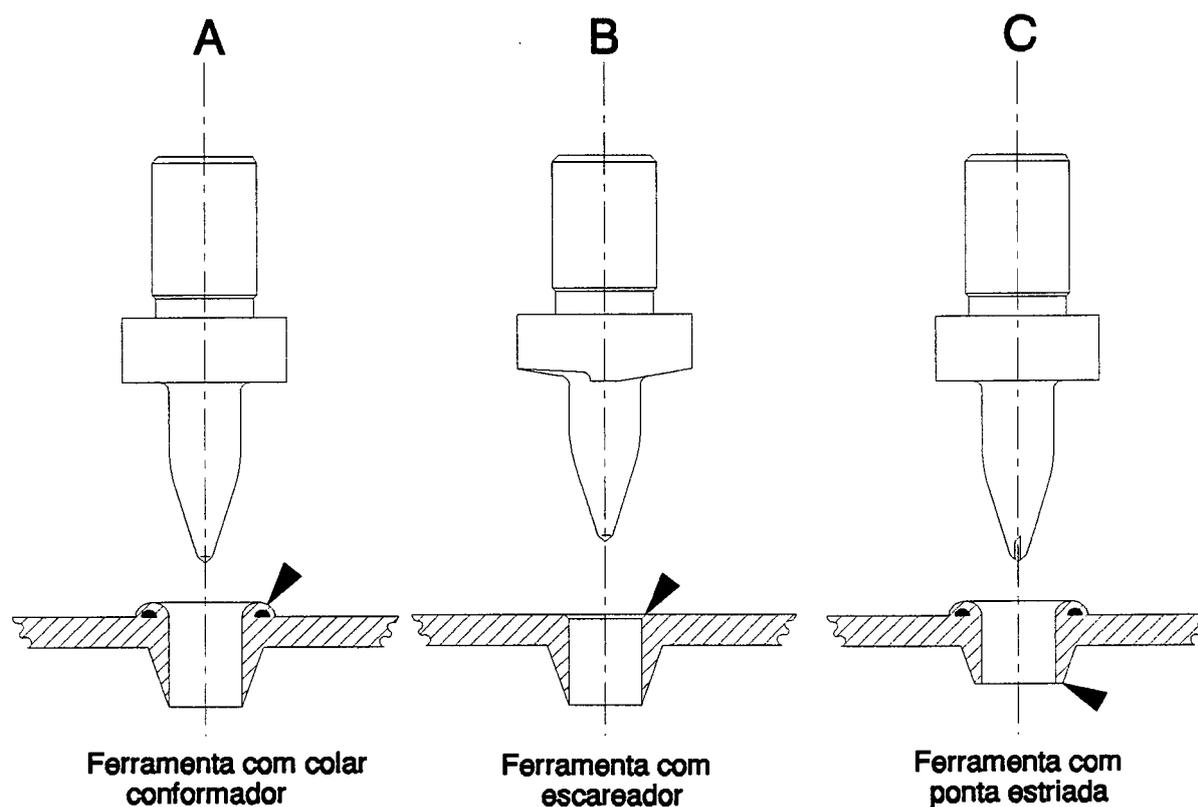


Figura 2.18 - Tipos de ferramentas de furação por escoamento

- Ferramenta com ponta estriada

Na ponta da ferramenta, em dois cantos poligonais, são retificados dois gumes. As principais vantagens da ferramenta com ponta estriada estão na redução da força de avanço e rotação necessárias, além de possibilitarem a eliminação mecânica da cobertura em superfícies com tratamento galvânico. Em ligas de alumínio com alto teor de silício, baixa a temperatura da peça (fig. 2.18.C).

Os diâmetros das ferramentas de furação por escoamento são produzidos de 3 a 30 mm.

2.6.3. MANDRIL

A fixação da ferramenta de metal duro não é satisfatoriamente desempenhada por mandris convencionais, pois o metal duro não permite uma fixação por interferência. Uma força de fixação adequada é obtida pela fixação com sistema de pinças (fig.2.19) [5].

Como durante o processo de furação por escoamento as temperaturas podem chegar até 900 K, é necessário dispor de um meio de refrigeração pelo ar, obtido por aletas, cavidades ou furos dispostos no corpo do mandril. É necessário dissipar o calor transmitido pela ferramenta antes que ele provoque danos aos mancais da máquina-ferramenta. No mandril desenvolvido pela Flowdrill b.v., este arrefecimento é obtido por um colar de alumínio com furos radiais e axiais interligados que forçam a circulação do ar com a ferramenta em movimento (fig. 2.19).

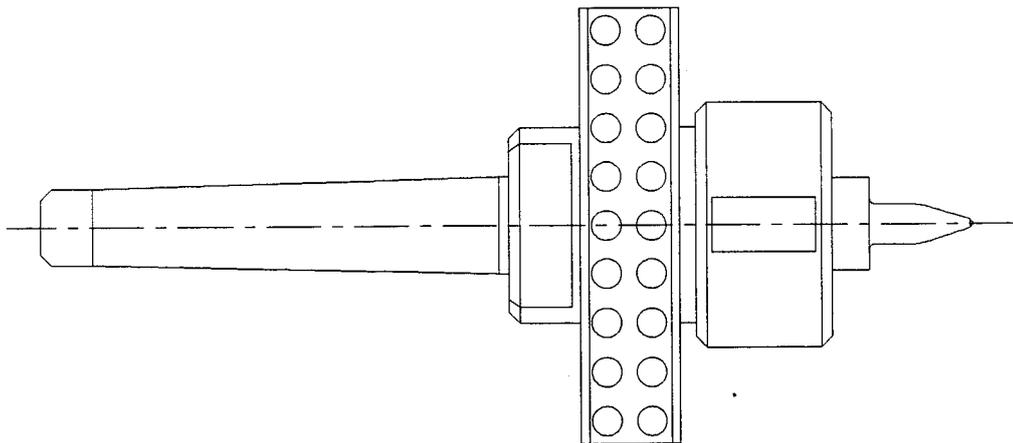


Figura 2.19 - Mandril com pinça especial para o processo de furação por escoamento

2.6.4. LUBRIFICANTE

Em consequência das temperaturas elevadas durante a operação de furação por escoamento, se faz necessária a utilização de lubrificante no processo, o que evita a adesão de material na ferramenta e reduz o desgaste da mesma.

Foi desenvolvido um lubrificante especial a base de sulfeto de zinco que pode ser aplicado manualmente ou automaticamente na ferramenta [60]. De consistência pastosa, este lubrificante é espalhado com um pincel a cada ciclo de furações sobre a ferramenta. Para garantir as paredes do furo lisas, é aconselhável lubrificar em especial a área entre o cone de atrito e a parte cilíndrica. A lubrificação diminui a temperatura de trabalho da ferramenta e aumenta sua vida útil. Para ferramentas que são utilizadas em máquinas automáticas existem dispositivos que permitem a lubrificação automática da ferramenta [31].

2.7. CUIDADOS NO PROCESSO DE FURAÇÃO POR ESCOAMENTO

A ferramenta de furação por escoamento é robusta, mas existem alguns cuidados que devem ser tomados para aumentar a durabilidade da ferramenta e também melhorar a qualidade dos furos fabricados [31].

Embora as ferramentas de furação por escoamento tenham boa resistência mecânica a altas temperaturas, são sensíveis a grandes gradientes de temperatura. Os fabricantes recomendam evitar tanto o aquecimento como o resfriamento rápido da ferramenta .

Mesmo com sua alta dureza e boa resistência ao desgaste, o metal duro é relativamente frágil. Deve-se evitar que sua ponta tenha contato brusco com a peça ou que a ferramenta venha a cair, pois choques podem danificar a ponta da ferramenta.

A rigidez e o alinhamento do fuso da máquina são muito importantes, pois desvios podem acarretar a quebra da ferramenta.

Quando, por qualquer motivo, houver uma interrupção durante o processo de furação por escoamento, o material da peça se resfria e o furo já iniciado se contrai. Para o reinício do processo é necessário recolocar a ferramenta cuidadosamente na posição do furo já iniciado e fornecer calor por atrito para recomeçar o processo. O reinício imediato do processo após a interrupção pode acarretar a quebra da ferramenta.

2.8. FUNDAMENTAÇÃO TECNOLÓGICA DA FURAÇÃO POR ESCOAMENTO

As características do processo de furação por escoamento dependem das variáveis e dos parâmetros de entrada empregados. Como variáveis principais temos a rotação e o avanço e como parâmetros o diâmetro da ferramenta, a espessura da chapa, o material da chapa, condutividade térmica, calor específico, resistência a deformação, material da ferramenta e lubrificante empregado.

As características do processo são avaliadas pela força de avanço ou pela rotação e uma força de avanço ou ainda pelo avanço (dependendo da variável de entrada utilizada), também pelo momento torçor, pela temperatura na região de deformação e pela potência consumida.

Os resultados de trabalho são avaliados pela forma do furo e das rebarbas, pela região térmica e mecanicamente afetadas e pelo desgaste da ferramenta.

A furação por escoamento apenas apresenta bons resultados quando várias exigências são preenchidas simultaneamente. Necessitam-se temperaturas elevadas que propiciem a deformabilidade do material.

As principais grandezas que influenciam o processo são a rotação e o avanço. Outros fatores como o estado da ferramenta, lubrificantes utilizados, material da peça e material da ferramenta apresentam influências no desempenho do processo.

2.8.1. CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO

- Força de avanço

No caso do processo com avanço constante, a força de avanço exercida durante o processo de furação por escoamento é proporcional ao avanço utilizado. Neste caso ela também depende das características do material empregado, da forma geométrica da ferramenta, do material da ferramenta, etc, já no caso do processo utilizando forças de avanços constantes (F_p), o que predomina é exatamente a força de avanço utilizada [5].

- Momento Torçor

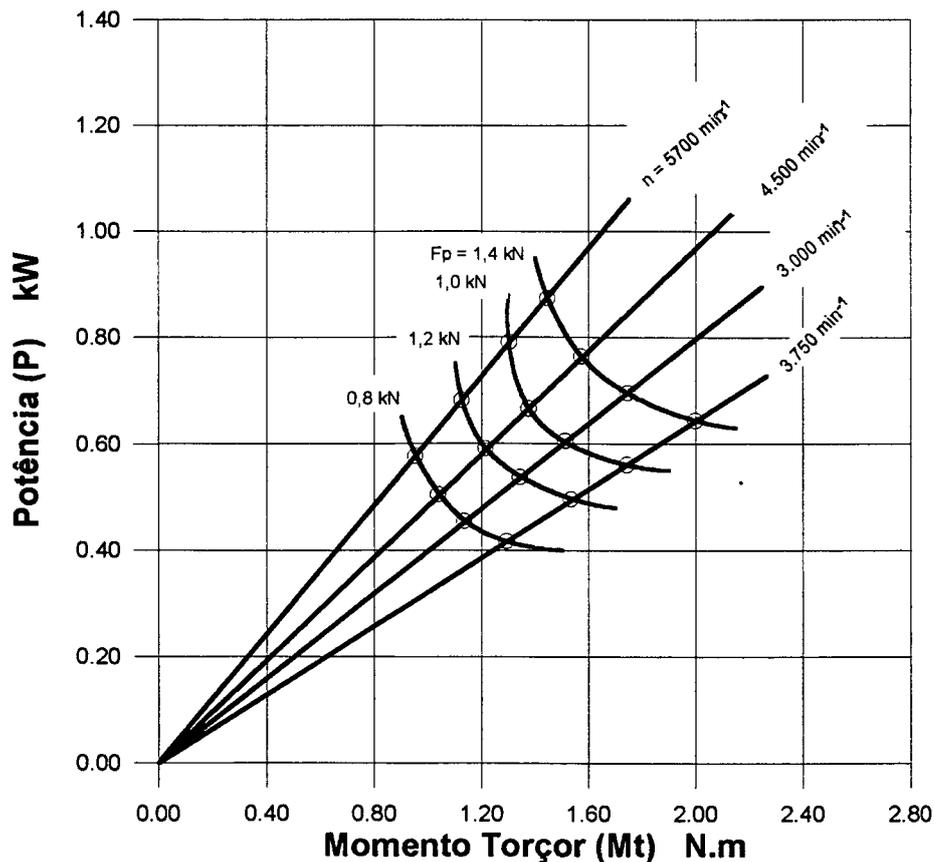


Figura 2.20 - Momento Torçor (M_t) em função da Força de Avanço constante durante o processo (F_p) e rotação (n)

O momento torçor a ser aplicado na furação por escoamento cresce com o aumento da força de avanço e diminui com o aumento da rotação (fig. 2.20) [5].

Os valores absolutos de rotação mostram o limite do emprego do processo em máquinas convencionais, principalmente quando se considera ainda os momentos torçores a serem aplicados.

- Temperatura no processo de furação por escoamento

A determinação de temperaturas em corpos rígidos pode ser realizada de diversas maneiras. Aos métodos físicos de medição, os quais trabalham com contato direto na condução de calor, pertence o método dos termopares. Num outro processo registra-se a irradiação térmica de um corpo sem contato através de um pirômetro infravermelho. Também por processos químicos é possível a determinação da temperatura de um corpo. Alguns sais de metais pesados mudam a sua coloração com a variação da temperatura, isto é, ultrapassando uma determinada temperatura ocorre uma mudança de cor, o que pode ser utilizado para determinação da temperatura de corpos rígidos, colocando esses sais sobre a superfície do corpo de prova.

Em seu trabalho Kretschmer [4] utilizou chapas de 2 mm de espessura com ferramentas de diâmetro de 5,07 mm para verificação das temperaturas. Primeiramente com a utilização de bastão de cores encontram-se temperaturas na ordem 560°C em toda a zona de conformação e na borda mais alta do furo ultrapassou 715°C. A precisão deste processo é bastante pequena, pois a área circular é reduzida e os resultados dependem da observação do pesquisador.

Kretschmer então partiu para a medição de temperaturas do processo utilizando-se de um pirômetro infravermelho. Encontrou temperaturas máximas na ordem de 680°C a 710°C no pirômetro. Este processo também não se mostrou eficaz, pois um dos fatores que influencia a medição é o ângulo de reflexão do corpo irradiante. Esse fator deve ser ajustado e tornar-se

constante durante o processo. Tal fato não ocorre na furação por escoamento devido à formação da rebarba superior, o que provoca uma alteração no ângulo de reflexão (fig.2.21).

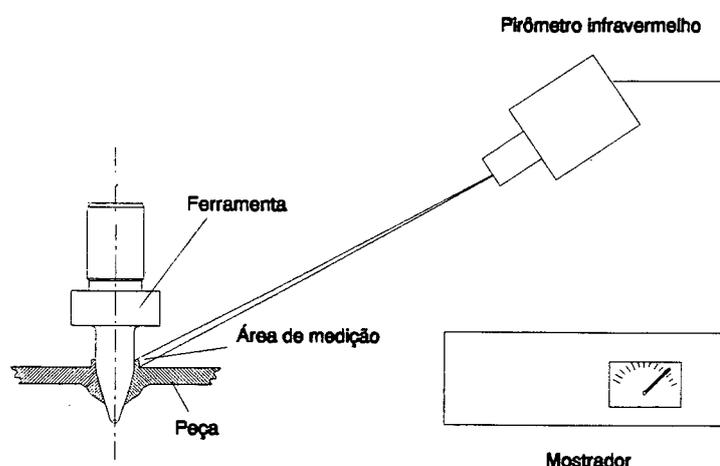


Figura 2.21 - Esquema de medição da temperatura na furação por escoamento utilizando um pirômetro infravermelho

Considerando-se o processo adiabático (troca de calor desprezível durante a duração do processo) e empregando-se modelos matemáticos desenvolvidos por Carslaw, Jaeger, Rykalin e Rosenthal [62, 63, 64, 65] para a soldagem de chapas delgadas, pode-se determinar a temperatura máxima, medindo-se a temperatura de dois pontos afastados do furo, fig. 2.22. Nos ensaios obtiveram-se temperaturas máximas na borda do furo com um valor médio de 672°C (fig. 2.23).

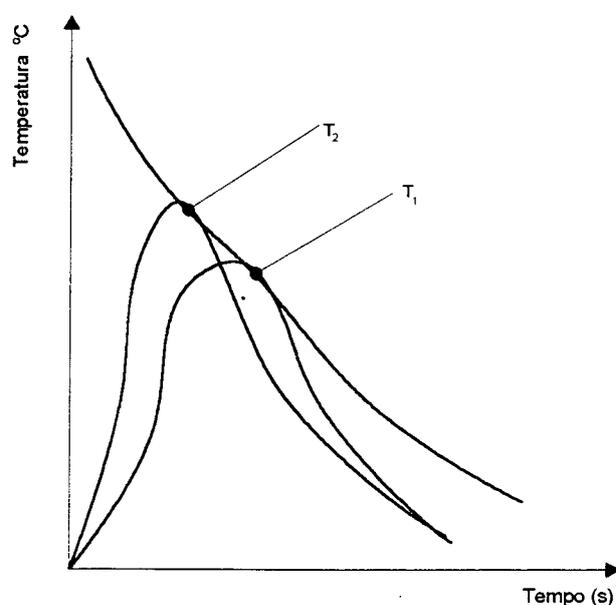


Figura 2.22 - Levantamento da curva de temperatura em dois pontos do corpo de prova

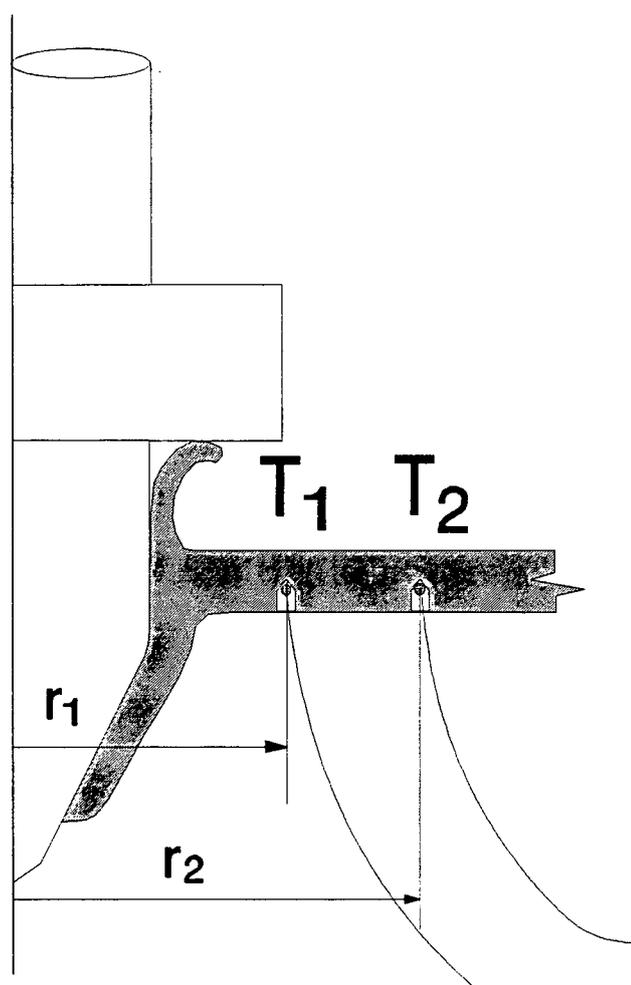


Figura 2.23 - Esquema de posicionamento de termopares utilizado na medição de temperatura na furação por escoamento

- Deslocamento do material

Em seu trabalho Kretschmer apresenta esquematicamente o material da peça antes e após do escoamento. O lado esquerdo da fig. 2.24 mostra o material antes do escoamento e o lado direito o material já escoado [4].

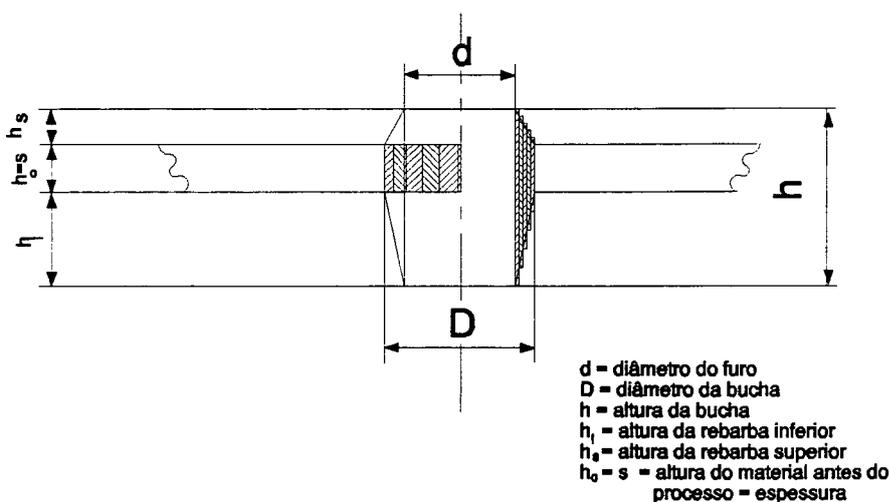


Figura 2.24 - Deslocamento esquemático do material no processo de furação por escoamento

2.8.2. RESULTADOS DE TRABALHO

- Dimensões da bucha

Com relação ao diâmetro dos furos fabricados com a ferramenta de furação por escoamento, eles dependem basicamente da medida da ferramenta, existindo pouca dependência das grandezas envolvidas no processo como a rotação (n) e a força de avanço (f) [5].

Um importante fato a considerar é a pequena dispersão dos resultados do diâmetro do furo, provando a excelente reprodutividade do processo.

O diâmetro (D) da bucha e a altura da bucha (h) são influenciados pela rotação

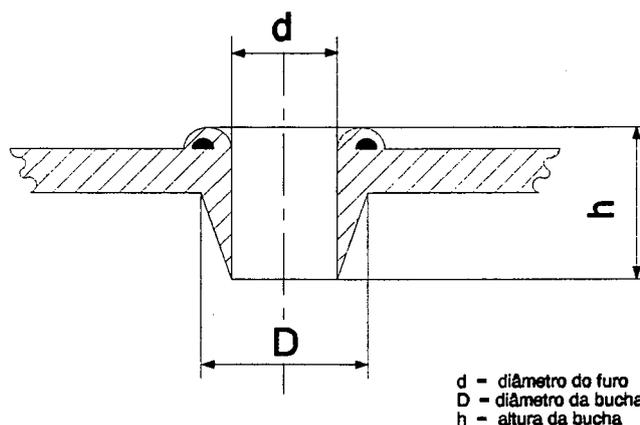


Figura 2.25 - Dimensões principais da bucha escoada

(n) e pela força de avanço constante (F_p). A figura 2.26 mostra que o diâmetro da bucha aumenta com forças de pressão maiores e diminui com rotações menores. Em relação à altura das buchas as proporções são inversas. A fig.2.27 mostra uma diminuição da altura das buchas com o aumento da força de avanço (F_p) alturas menores em rotações menores. Isto é creditado a uma necessária constância do volume do material durante o processo de escoamento, pois se o material continua escoando, a altura da bucha aumenta e o diâmetro da bucha diminui e vice-versa [5]

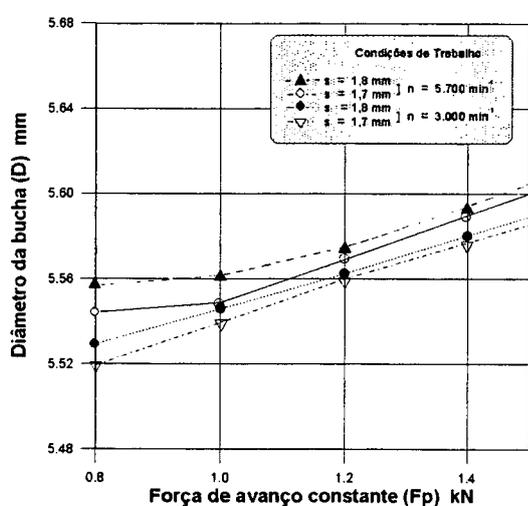


Figura 2.26 - Diâmetro da bucha em função da força de avanço constante (F_p) para diferentes espessuras de chapas e rotações (n)

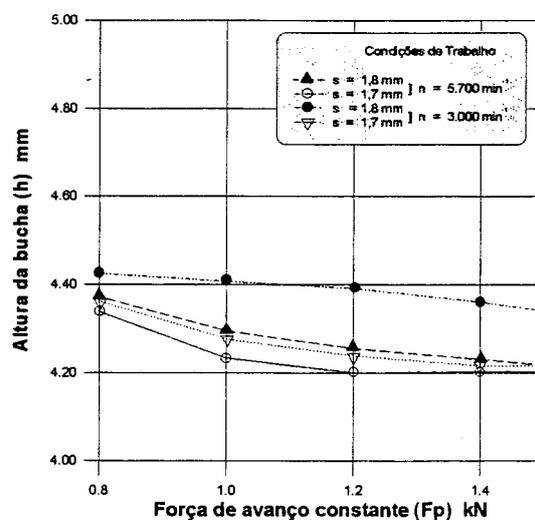


Figura 2.27 - Altura da bucha em função da força de avanço constante (F_p) para diferentes espessuras de chapas (s) e rotações (n)

A relação encontrada entre a espessura do material (e) e altura da bucha formada (h) é de que a altura da bucha representa aproximadamente 2,5 vezes o valor da espessura da chapa [5 ; 8]

- Vida da ferramenta

A vida de uma ferramenta de furação por escoamento é muito grande. A empresa Flowdrill b.v., uma das fabricantes das ferramentas, estima em 10.000 furos a vida útil de uma ferramenta de furação por escoamento fabricada em metal duro [31].

Já a empresa Drabus apresenta uma vida útil em torno de 6.000 furos com ferramentas de metal duro. Em ferramentas produzidas em *Cermet* a vida útil prevista é de 15.000 furos. O espantoso valor de 155.000 furos é a vida prevista para ferramentas revestidas (fig. 2.28) [15].

O desgaste da ferramenta que determina o seu final de vida predomina em dois locais da ferramenta, ou seja; na ponta e na parte cilíndrica. O desgaste da ponta da ferramenta pode ser resolvido em até 4 reafiações [8].

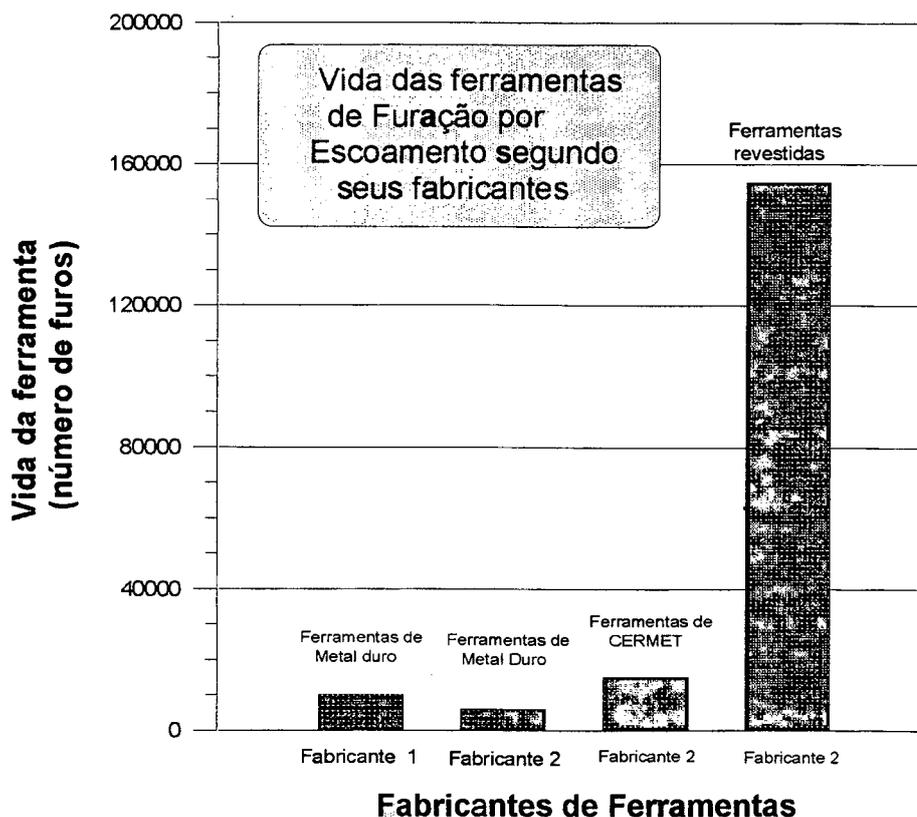


Figura 2.28 - Vida provável de ferramentas de furação por escoamento

- Resistência de buchas escoadas em chapas sobrepostas

A furação por escoamento pode ser empregada na furação simultânea de duas chapas sobrepostas. Neste caso a rebarba da chapa superior endenta na chapa inferior, obtendo-se assim uma união das chapas. Chapas unidas desta forma podem sofrer uma solicitação à tração e também uma solicitação cisalhante. Para determinação das forças cisalhantes e de tração limite, Kretschmer [28] realizou ensaios conforme mostram as figuras 2.29 e 2.30.

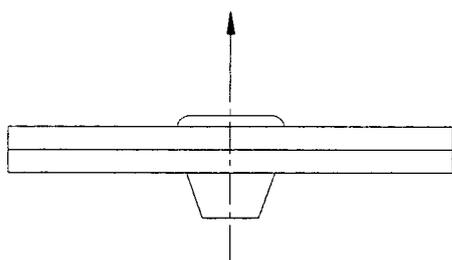


Figura 2.29 - Ensaio de força de tração

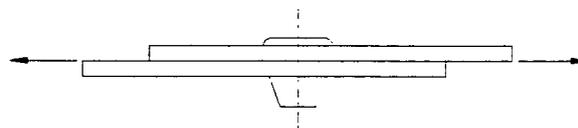


Figura 2.30 - Ensaio de força cisalhante

Os ensaios foram realizados analisando-se 3 modelos de corpos de prova em chapas duplas (germinadas) de 1,3 mm de espessura, em chapa de aço X8 Cr17, utilizando-se uma ferramenta de diâmetro apropriado para rosca M6. Os modelos testados foram :

- furo escareado ;
- furo com rebarba superior conformada ;
- furo roscado.

Os resultados mostraram que a união com furos de rebarba conformada apresentou os maiores valores para ambos os ensaios. Os valores encontrados para furo escareado foram bem próximos aos valores encontrados para o furo com rebarba superior conformada. Já o furo posteriormente roscado apresentou valores em torno da metade dos valores apresentados para os outros dois tipos de união.

2.9. MATERIAIS UTILIZÁVEIS

Pode-se dizer que todos os materiais metálicos maleáveis se adequam ao processo de furação por escoamento. Por isso quase todas as placas finas de aços soldáveis, ligados ou não-ligados, ligas de alumínio, cobre, bronze, metais magnéticos e ligas especiais em chapas finas podem ser furadas por este processo. Basicamente todos os materiais que podem ser furados por este processo, podem também ser rosqueados por conformação. A trabalhabilidade aumenta com a plasticidade do material. Abaixo são relacionadas as especificações dos materiais que podem ser furados por escoamento.

- Aços ligados ou não-ligados (também os inoxidáveis e resistentes a ácidos) até cerca de 700 N/mm² de resistência à tração.
- Metais não ferrosos (com exceção de metais frágeis como CuZn40Pb2).
- Metais leves com composição de Si menor que 5%.
- Aço inoxidável austenítico com até 12% de manganês (em porcentagem maior o manganês provoca um elevado encruamento no aço inoxidável).

O maior número de aplicações do processo de furação por escoamento está na fabricação de peças em aço, mas existem atualmente também algumas aplicações em outros materiais [32]. Materiais como o alumínio e o aço austenítico, por não apresentarem encruamento durante a deformação, necessitam de cuidados especiais para a realização de furos escoados. Um inconveniente apresentado pelo alumínio é sua tendência à hiperplastificação com o aumento da temperatura, dificultando a realização satisfatória da furação por escoamento. Nesses materiais um lubrificante que minimize o atrito leva a resultados melhores.

A bucha produzida pela furação por escoamento em alumínio apresenta uma variação acentuada que pode ser explicada pela sua grande deformabilidade a quente. Esta característica dificulta sobretudo a execução de roscas em alumínio [32].

2.10. SUGESTÕES PARA UMA MAIOR PRODUTIVIDADE DO PROCESSO

Segundo um dos fabricantes de ferramentas para a furação por escoamento, Flowdrill b.v. da Holanda, na furação com diâmetros maiores em chapas de espessuras maiores ou na furação de materiais mais duros, é recomendável a realização de pré-furos com uma ferramenta de furação por escoamento de diâmetro menor. Este procedimento aumenta a vida útil da ferramenta, além de diminuir as forças envolvidas no processo [31].

Na utilização de ferramentas de furação por escoamento com escareador recomenda-se uma redução de 50 a 70% da rotação normalmente utilizada para ferramentas normais. Esta redução se faz necessária para poupar os gumes na remoção das rebarbas superiores.

Uma limpeza periódica da ferramenta de furação por escoamento é necessária, pois mesmo com a lubrificação adequada, partículas de material da peça aderem na ferramenta aumentando o atrito e causando um aquecimento indesejável e uma piora na qualidade superficial dos furos.

As superfícies de peças revestidas por algum tratamento ou mesmo oxidadas e sujas devem ser furadas com ferramenta de ponta estriada. Em materiais com revestimento galvânico, como por exemplo o zinco, esse procedimento se torna essencial. O zinco tem baixo ponto de fusão, acarretando rápida fusão dessa camada que vai atuar como lubrificante evitando o aquecimento geral da peça e prejudicando o processo. Utilizando a ferramenta com ponta estriada o local onde ocorriam as piores condições de atrito, no centro do furo, é usinado, diminuindo este problema.

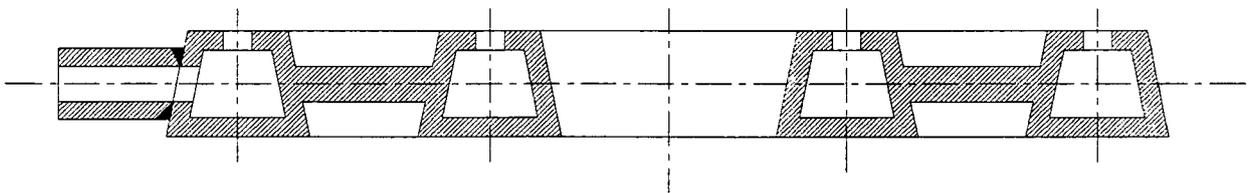
2.11. APLICAÇÕES

A furação por escoamento, seguida ou não pelo rosqueamento por conformação, é adequada para peças que requerem a união de chapas finas com roscas firmes, grandes áreas de apoio para fixação, conexões que suportem peso, batentes, etc. [15, 16, 31]

No decorrer dos últimos anos, com o desenvolvimento da tecnologia de furação por escoamento e sua maior divulgação, o processo encontrou diversas aplicações.

A primeira importante aplicação desse novo processo ocorreu na Inglaterra em queimadores de gás. Conseguiu-se uma grande flexibilidade na produção de pequenas séries, uma simplificação na operação de escareamento e uma redução considerável do peso em relação a peças estampadas (fig. 2.31) [2].

Distribuidor de gás - fundido e furado com brocas helicoidais



Distribuidor de gás em tubo - furado por escoamento

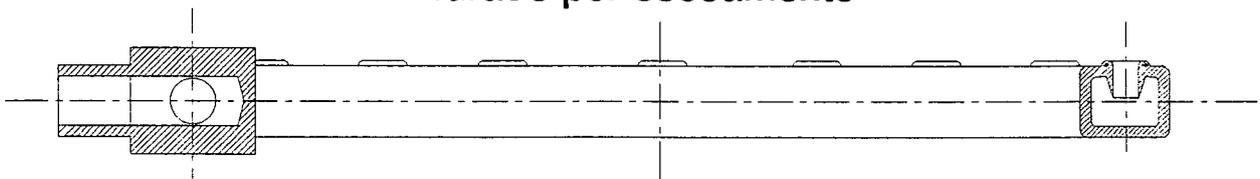


Figura 2.31 - Distribuidor de gás - Uma das primeiras peças a serem fabricadas industrialmente pela furação por escoamento

Outra importante aplicação de furos escoados e posteriormente roscados por conformação se deu também na indústria de condutores de gás na Inglaterra. As especificações da Companhia Britânica de Gás exigiam dimensões estreitas para facilitar a selagem. Antes desse novo processo necessitava-se o uso de tubo fundidos de paredes grossas ou junções puncionadas e soldadas, que tinham grandes desvantagens econômicas [8].

A primeira aplicação da furação por escoamento em máquinas automáticas ocorreu em 1981 na empresa francesa Bertrand Faure, em estruturas de assento de chassis de automóveis, com equipamentos e ferramentas da empresa francesa SOMEX, que obteve licença de fabricação da empresa holandesa DRABUS (uma das detentoras da patente) [16].

Depois de alguns anos um grande número de indústrias automobilísticas francesas começaram a utilizar ferramentas de furação por escoamento em diversos tipos de máquinas automáticas dotadas de unidades de fabricação adequadas (fig. 2.32). A empresa Renault Vehicules Industriels é uma delas, vindo a utilizar o processo em máquinas CNC para fabricação de peças para automóveis. A empresa Somex começou a fabricar máquinas desenvolvidas especialmente para usuários da furação por escoamento, dotando-as de recursos que asseguravam uma automatização do processo com conseqüente redução de custo.

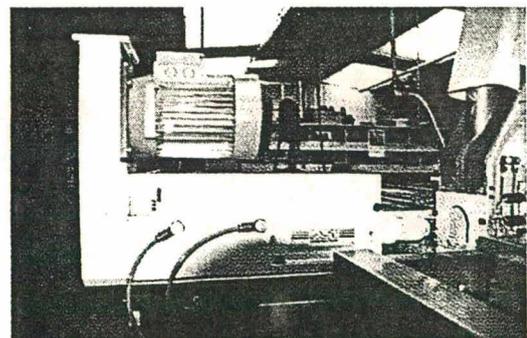
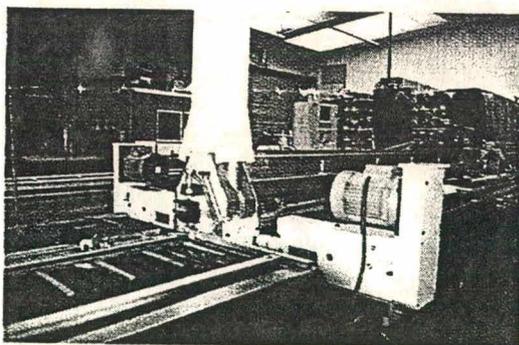


Figura 2.32 - Máquina automática para furação por escoamento

Uma empresa do grupo PSA da França foi uma das que adquiriu diversas máquinas especiais para utilização da furação por escoamento em cardans de direção fabricados a partir de tubos, conseguindo grandes vantagens principalmente devido à redução substancial do peso das peças e automação da linha de fabricação.

Outra empresa que recebeu máquinas especiais para o processo de furação por escoamento foi a empresa do ramo de móveis STRAFOR da França. A necessidade do desenvolvimento de formas tubulares exigido pelas novas tendências de mercado marcaram a aquisição dos novos equipamentos.

A empresa Drabus, entregou à empresa Charuel S.A. o desenvolvimento de máquinas especiais para utilização no processo de furação por escoamento. Desde 1991 essas máquinas vem sendo comercializadas e o desenvolvimento de melhores ferramentas faz parte da automação pretendida para o processo.

A empresa Flowdrill da Holanda vem se dedicando ao desenvolvimento e comercialização de seus produtos para a furação por escoamento desde 1988 e traz referências a várias aplicações possíveis [31].

As figuras 2.33 a 2.38 ilustram bem as possibilidades de aplicação desse novo processo de trabalho.

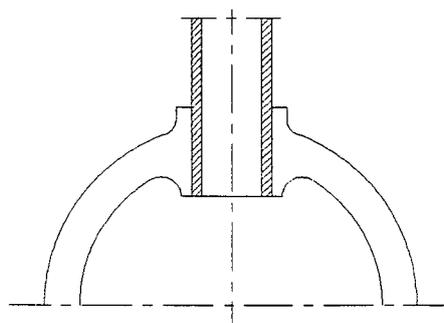


Figura 2.33 - Conexão prensada e que pode ser soldada

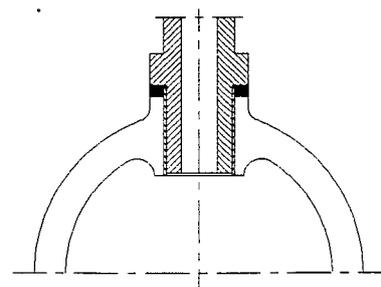


Figura 2.34 - Conexão com vedação

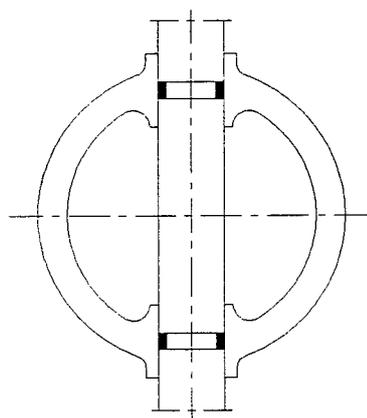


Figura 2.35 - Vedação O-Ring em perfis furados por escoamento

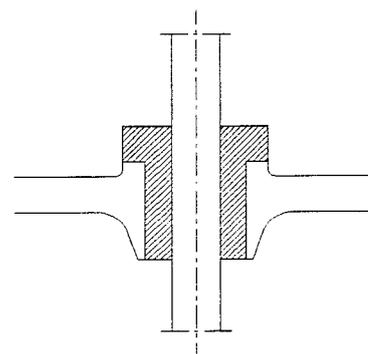


Figura 2.36 - Superfície de apoio ou assento para apoios planos

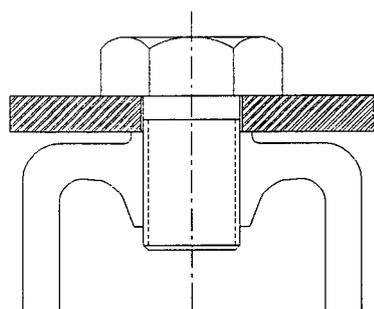


Figura 2.37 - Conexão com parafuso em bucha escoada com colar

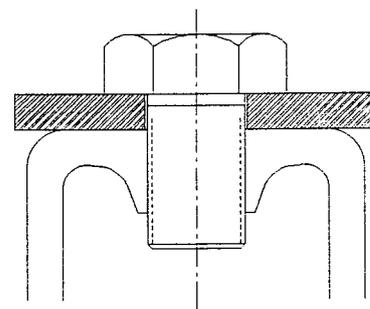


Figura 2.38 - Conexão com parafuso em bucha escoada escareada

A furação por escoamento é indicada para utilização em diversas aplicações, como na fabricação de peças de radiadores, equipamentos para fornecimento de água ou gás, refrigeradores, ar condicionado e trocadores de calor, equipamentos de iluminação e quadros de distribuição de energia elétrica, móveis para computador e escritórios, instalações de irrigação, instalações domésticas, equipamentos para camping, construção de caldeiras, cilindros, tambores, implementos agrícolas, indústria automobilística e de carrocerias, etc..

2.12. HISTÓRICO - ROSQUEAMENTO POR CONFORMAÇÃO

O rosqueamento interno sem geração de cavacos teve suas primeiras versões mal sucedidas antes dos anos 40. Mas o primeiro projeto de macho de conformação que teve sucesso data de meados dos anos 50 [25].

A empresa Vermont Tap & Die Co. dos Estados Unidos desenvolveu seu primeiro macho de conformação a frio em 1957, e foi batizado de "Wedger" (entalador). A idéia de fabricar roscas internas por conformação ao invés de serem produzidas por usinagem sempre teve grandes atrativos. A inexistência de cavacos que conseqüentemente elimina a preocupação com sua retirada do local de trabalho, era uma das grandes vantagens vislumbradas [22].

O aumento da resistência da rosca devido ao encruamento, as maiores velocidades de conformação utilizadas e a conseqüente redução de tempo de processo, custos de fabricação e pequeno desgaste da ferramenta, levaram a um grande interesse das indústrias fabricantes de ferramentas pelo novo processo de rosqueamento por conformação (Flowtapping, Gewindefurcher) [25].

Embora houvessem várias vantagens já citadas anteriormente, os fabricantes de machos tiveram que solucionar diversos problemas apresentados por essa nova tecnologia de fabricação.

- momento torçor alto durante o processo ;
- geração excessiva de calor ;
- vida curta do macho de conformação ;
- profundidade limitada do furo ;
- acesso dificultado do lubrificante ou refrigerante ;
- necessidade de elevada precisão dimensional do furo prévio.

Uma das soluções encontradas foi a construção de machos de conformação com a adição de sulcos para penetração de lubrificante (fig. 2.39). Esta alternativa não obteve resultados satisfatórios pois os cantos dos sulcos produziam pequenos cavacos que eventualmente obstruíam o canal resultando em filetes de má qualidade [22].

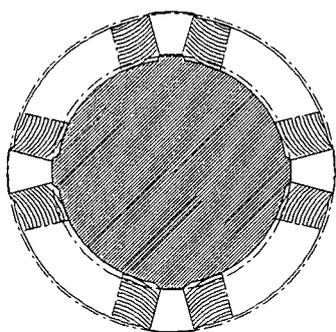


Figura 2.39 - Macho de conformação com sulcos

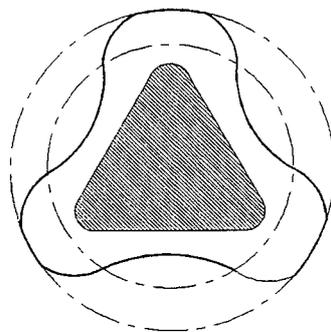


Figura 2.40 - Macho de conformação com três lóbulos

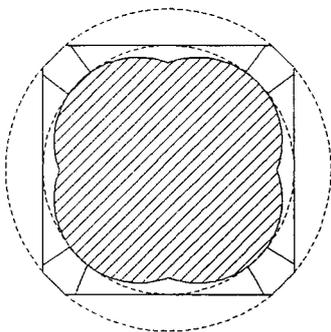


Figura 2.41 - Machos de conformação *Polygon*

Outra alternativa apresentada pelos fabricantes de ferramentas foi a construção de um macho de conformação com três lóbulos e três entalhes para facilitar a entrada de lubrificante (fig. 2.40).

Esta solução ainda encontrou alguma aplicação, mas a sua principal desvantagem era a perda considerável de resistência pela conseqüente menor área da seção transversal do macho, diminuindo sensivelmente a vida da ferramenta.

No início dos anos 70 houve um interesse renovado no processo de rosqueamento por conformação, o que levou a empresa Vermont Tap & Die Co. a projetar um macho de conformação chamado *Polygon* (fig. 2.41). O *Polygon* era um macho de conformação em geral hexagonal, que também podia ser triangular ou quadrangular. A superfície do macho tinha seus planos igualmente espaçados ao redor do comprimento do corpo.

A fabricação desse tipo de macho é consideravelmente diferente da fabricação de um macho convencional de usinagem, que normalmente é ranhurado para a saída dos cavacos [23]. Na fabricação dos machos de conformação primeiramente são usinadas suas superfícies igualmente espaçadas que cobrem o comprimento total do corpo. Posteriormente são afiadas em uma máquina convencional modificada para essa aplicação. As superfícies já afiadas são levadas a uma forma lenticular (convexa em todos os lados)[22 ; 25].

A nova forma é uma ferramenta mecanicamente mais forte, necessitando menores momentos torçores para a fabricação da rosca, também é menos sensível a variações de dimensão e qualidade do furo. É importante ressaltar a maior vida dessa nova forma de ferramenta de conformação.

Esse novo formato de macho de conformação, aliado a mudanças para melhoria da geometria e de equipamentos mais modernos para a execução desse tipo de ferramenta, é atualmente utilizado para realização desse processo (fig 2.42).

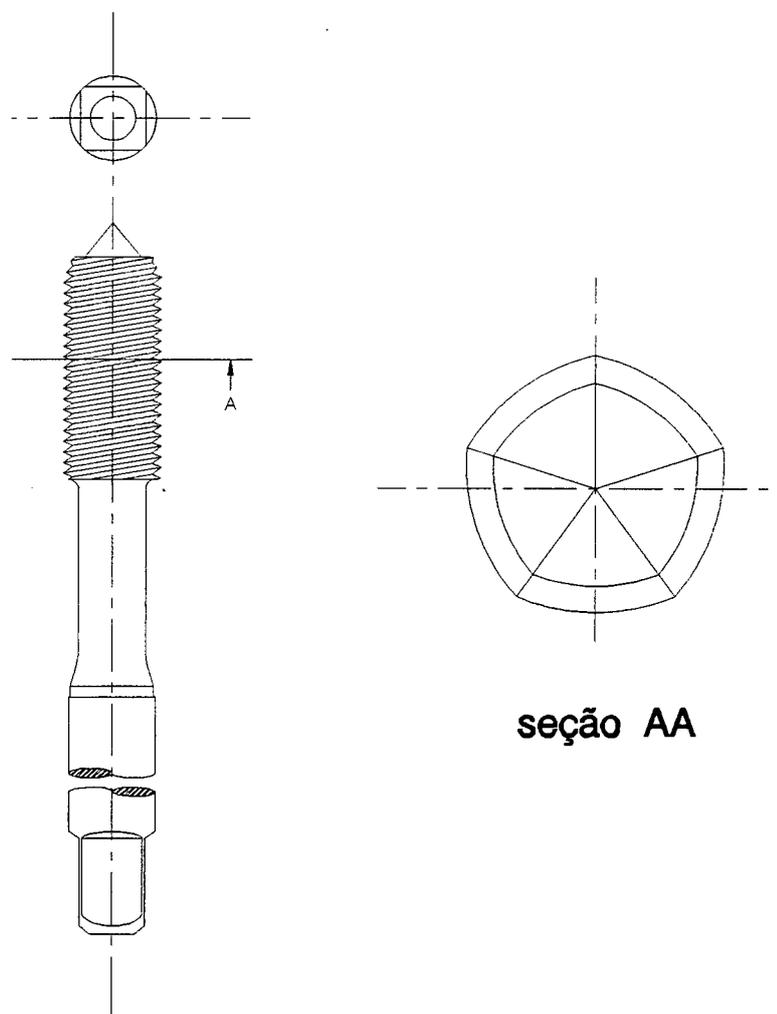


Figura 2.42 - Forma do macho de conformação atual

2.13. CINEMÁTICA DO PROCESSO DE ROSQUEAMENTO POR CONFORMAÇÃO

A norma alemã que classifica o rosqueamento por conformação é a DIN 8583, que o considera um processo de produção por pressão, classificado no subgrupo de endentamento. A norma descreve o processo como o endentamento de uma rosca externa em uma peça com uma ferramenta que tem uma face de trabalho na forma de um parafuso.

A rosca é formada pelo deslocamento radial do material da peça entre as saliências do macho em rotação. As superfícies produzidas nos filetes são análogas aquelas produzidas por processos de forjamento, laminação e trefilação externa de roscas.

O macho de conformação é fabricado em aço rápido e possui uma ponta cônica que abrange de 2 a 4 filetes do macho, sendo estes menores que o diâmetro efetivo do macho. São estes filetes os responsáveis pelo trabalho de deslocamento inicial do material e por guiarem a ferramenta (fig. 2.43) [15 ; 31].

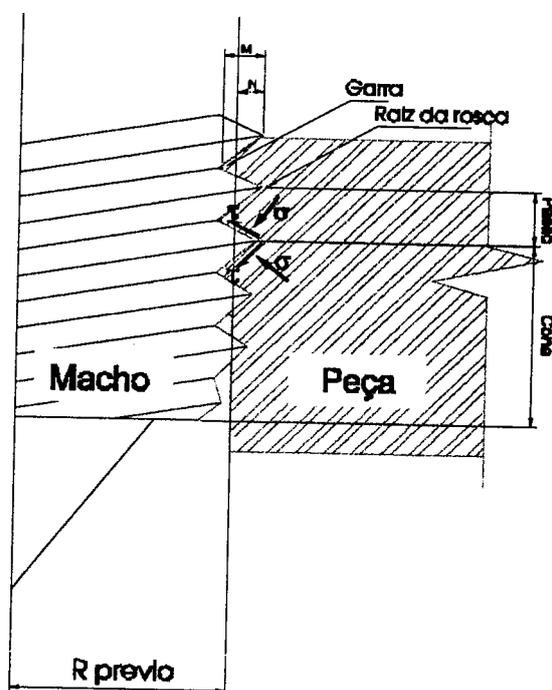


Figura 2.43 - Formação dos filetes no rosqueamento por conformação

A ação de conformar ocorre nas rampas precedentes das cristas dos filetes dos machos (lóbulos), diminuindo a probabilidade de ocorrência de arrancamento de pequenos cavacos de material (galling) [23].

A aplicação desse tipo de ferramenta é bastante ampla e vai desde aços moles, alumínio, cobre, aço cromo até aço rápido.

2.14. FUNDAMENTAÇÃO TECNOLÓGICA DO ROSQUEAMENTO POR CONFORMAÇÃO

As características do processo de rosqueamento por conformação também dependem das variáveis e dos parâmetros de entrada empregados. Como variáveis principais temos a velocidade de conformação, a rotação e o avanço e como parâmetros o diâmetro da ferramenta, a espessura da chapa, o material da chapa, condutividade térmica, resistência a deformação, material da ferramenta e lubrificante empregado.

As características do processo são avaliadas basicamente pelo momento torçor e pela forma do filete produzido.

Os resultados de trabalho são avaliados pela dimensão das roscas, resistência das roscas, vida da ferramenta, desgaste da ferramenta, etc.

2.14.1. VARIÁVEIS DE ENTRADA

- *Velocidade de conformação*

A velocidade de conformação utilizada no rosqueamento por conformação deve ser o dobro da velocidade de corte utilizada para o processo utilizando machos de usinagem. Isto leva a melhores resultados de trabalho, pois o macho empurra o material da peça com maior eficiência em maiores rotações. Esse comportamento da velocidade de conformação leva a tempos de processos menores, reduzindo custos de fabricação [22 ; 25].

A velocidade de conformação recomendada por um dos fabricantes de machos de conformação (Flowdrill) é 100% maior que a velocidade de corte utilizada para machos de corte. O fabricante cita que machos de conformação revestidos podem aumentar a velocidade de

conformação do processo de 3 a 10 vezes, dependendo do material a ser roscado e do diâmetro do furo [31].

Informações mais atuais nos dão conta da possibilidade da realização do rosqueamento por conformação com velocidade de até 3 vezes maiores que as utilizadas no processo de rosqueamento por usinagem [14]. Velocidades de conformação na ordem de até 30 m/min são consideradas normais e recomendadas pelos fabricantes [30].

2.14.2. PARÂMETROS DE ENTRADA

- Lubrificação

A lubrificação é um dos pontos importantes durante a execução do processo de rosqueamento por conformação. Segundo Menshakov [26] o principal efeito da lubrificação é a redução das tensões de cisalhamento (limite de escoamento) em uma fina camada limite de metal da peça. As forças de atrito envolvidas no processo causam um aumento na quantidade de trabalho, aumento do desgaste da face de trabalho e tem uma considerável influência no estado e qualidade da superfície formada.

A utilização de lubrificantes reduz o aparecimento desse efeito, que é percebido através da medição dos momentos torçores.

Nelis [27] e Menshakov [26] concluíram que o efeito do lubrificante é diminuir os esforços do momento torçor durante o processo.

2.14.3. CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO

- Momentos torçores durante o processo

Os resultados de momento torçor no processo de rosqueamento por conformação fornecem resultados importantes sobre a cinemática do processo.

Os momentos torçores necessários ao rosqueamento por conformação são consideravelmente maiores que os momentos torçores no rosqueamento convencional, e dependem do material da peça e da porcentagem da altura teórica dos filetes a serem produzidos.

Segundo Novosel [22 ; 25] os momentos torçores necessários para o rosqueamento por conformação são de até 50% maiores do que os verificados no processo com um macho convencional por usinagem. Já Oxford [23] considera que certos materiais como o alumínio podem apresentar momentos torçores excessivamente altos no rosqueamento por conformação, devido ao alto coeficiente de atrito cinemático desse material. A figura 2.44 mostra valores de momento torçor para diversos materiais.

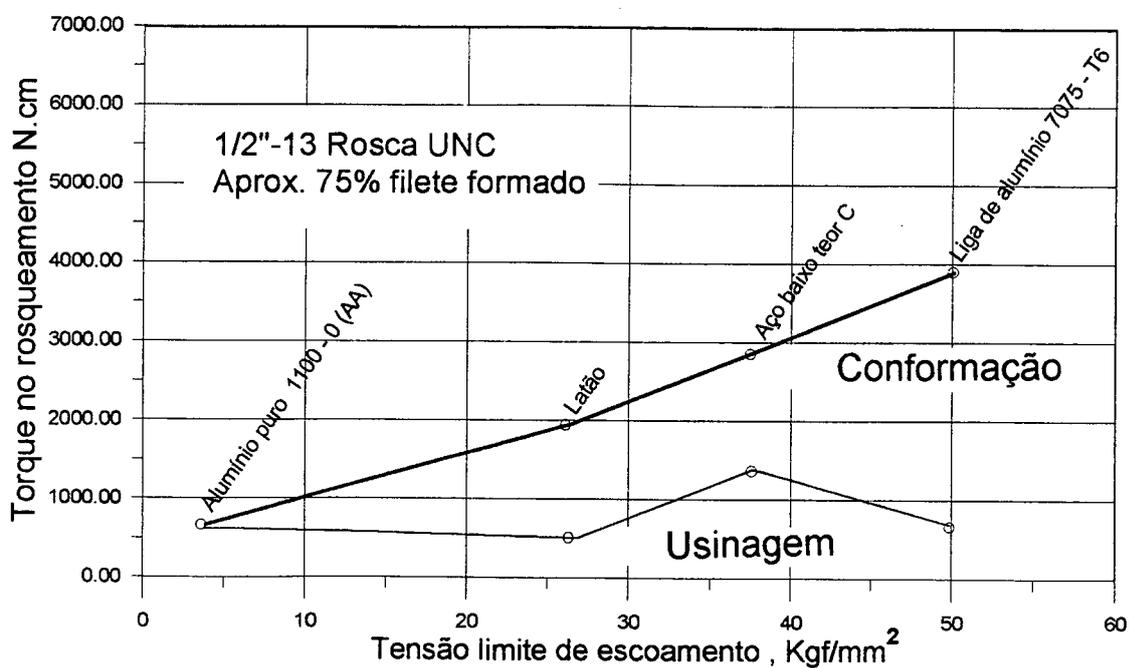


Figura 2.44 - Experimentos de Momento torçor para diversos materiais

Stemmer [44] considera que os valores de momento torçor do rosqueamento por conformação são sempre maiores e chegam a alcançar até 3 vezes o valores encontrados para o processo convencional. R. Kretschmer [12] considera em seus trabalhos valores de até 200% maiores que no rosqueamento convencional. A tabela 2.1 mostra valores de momento torçor para machos de conformação e machos convencionais (por usinagem).

DIÂMETRO E TIPO DO MACHO	Momento Torçor Médio (N.cm)		
	Alumínio	Latão	Aço
6 mm - 32 fil/pol MACHO USINAGEM	109,59	54,23	----
6 mm - 32 fil/pol MACHO CONFORMAÇÃO			
Chanfro Médio	203,37	140,10	151,40
Chanfro Curto	237,27	146,88	153,66

Tabela 2.1. - Torques requeridos no rosqueamento por conformação e no rosqueamento convencional para 75% do filete formado.

- Gráfico do Momento Torçor no rosqueamento

Em chapas produzidas na furação por escoamento Dekkers [31] cita valores de momento torçor 20% maiores no rosqueamento por conformação comparados aos valores encontrados no rosqueamento convencional.

Na operação de rosqueamento o sinal representativo de momento torçor se compõe de diferentes fases (fig. 2.45) [33].

Apenas duas zonas são exploradas no processamento de dados :

- Zona (1) para os valores médios e máximo do sinal.
- Zona (2) para o valor máximo do pico de reversão.

A exploração da zona (1) permite otimizar as condições de corte e controlar o desgaste da ferramenta. Estes dados são, aliás, utilizáveis para a pesquisa de geometrias ótimas de machos.

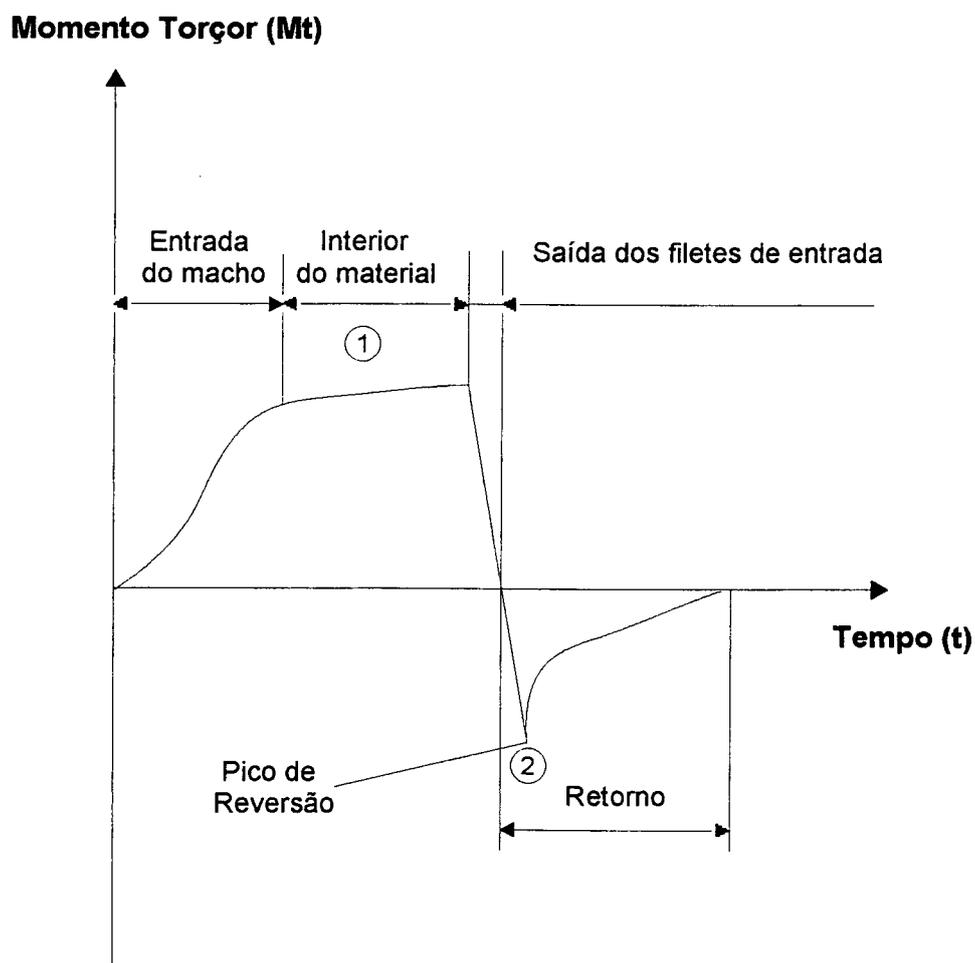


Figura 2.45 - Gráfico de Momento Torçor no rosqueamento

Na zona (2) o valor máximo do pico de reversão informa sobre a qualidade do furo realizado. Este pico, na verdade, é representativo do momento torçor de atrito quando do retorno do macho - um momento torçor evidentemente muito diferente se o furo for muito grande ou muito pequeno.

- Formação do filete de rosca

Uma das particularidades do processo de rosqueamento por conformação é que as fibras do material não são interrompidas, aumentando com isso a resistência das roscas. Já no rosqueamento por usinagem as fibras do material são cortadas pelo ação do macho e apresentam microtrincas na superfície dos filetes, resultando em menores resistências das roscas produzidas (fig. 2.46).

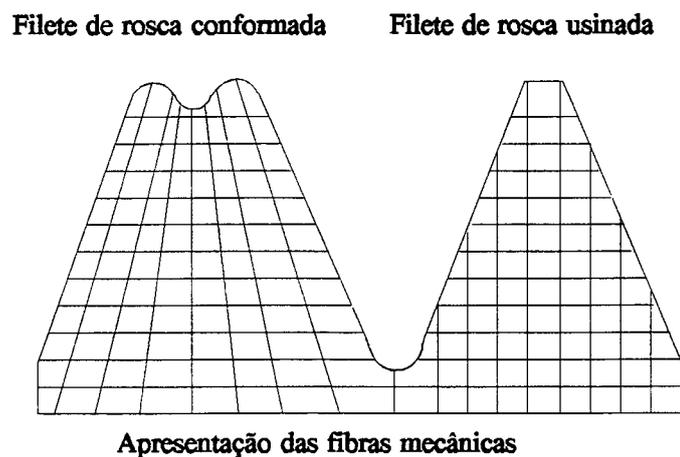


Figura 2.46 - Fibras mecânicas do filete conformado e do filete usinado

Outra importante característica do processo de rosqueamento por conformação é a formação na crista do filete de uma pequena cavidade denominada "garra", proveniente do encontro do material deslocado de dois flancos adjacentes (fig. 2.47).

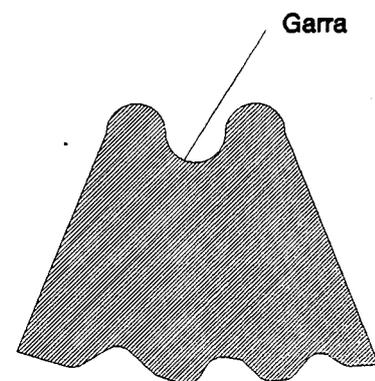


Figura 2.47 - Garra formada no filete conformado

- Escareamento dos furos

Para peças onde se necessitam superfícies planas é recomendável o escareamento dos furos roscados por conformação. Isso se deve ao princípio do processo, que desloca material, e certamente algum material será deslocado na direção do início do furo. Com o escareamento esse material não interferirá no desempenho da função pretendida.

2.14.4. RESULTADOS DE TRABALHO

- Dimensão do furo

O diâmetro do furo para o rosqueamento por conformação deve ser dimensionado de tal forma que o material que ascende nas cristas dos filetes da rosca preencha as ranhuras do macho. Um furo demasiadamente pequeno leva a uma interferência de material do macho e peça, levando a quebra do mesmo. Um furo demasiadamente grande leva a uma rosca mal formada.

Para o rosqueamento por conformação os furos devem ser um pouco maiores que os realizados para o rosqueamento convencional por usinagem. Materiais de resistência maior ou de deformações menores requerem furos menores do que aqueles com alongamentos maiores [30].

As equações empíricas 2.1 e 2.2 permitem determinar o diâmetro do pré-furo para o rosqueamento por conformação de matérias dúcteis [22 ; 44].

$$\text{diâmetro do furo} = \text{diâmetro da rosca} - 0.0068 \cdot \% \text{ filete} \cdot P \quad (2.1)$$

$$\text{diâmetro do furo} = \text{diâmetro da rosca} - \frac{0.0068 \cdot \% \text{ filete}}{\text{filetes por polegada}} \quad (2.2)$$

A porcentagem da altura teórica dos filetes depende do diâmetro do pré-furo. Um valor de 60 a 80% da altura dos filetes é suficiente e recomendável [23 ; 25].

- Resistências das roscas

Têm-se informações de que a resistência das roscas produzidas pelo rosqueamento por conformação é em geral de 20 a 50% maior que a de roscas produzidas por usinagem [14]. Isso se deve principalmente ao encruamento localizado na região dos filetes. As roscas conformadas estão aptas a resistir às forças requeridas pela DIN 267 - parte 4 [24].

Outro importante fator para o aumento da resistência das roscas é o crescimento da dureza do material do filete da rosca na ordem de 10 a 20% com relação ao material base da peça, devido ao encruamento do material.

- Precisão das roscas produzidas por deformação plástica

As roscas produzidas por deformação plástica utilizando machos de conformação mostram resultados precisos das dimensões da rosca interna produzida. Outro fator que caracteriza o processo é uma pequena redução do diâmetro efetivo da rosca devido à contração do metal da peça, que depende de muitos fatores [29].

- Vida da ferramenta de rosqueamento por conformação

A vida das ferramentas de rosqueamento por conformação é bem superior à vida das ferramentas de rosqueamento convencional por corte. Isto se justifica devido a diversos fatores, entre os quais temos : nos machos de usinagem, a existência de bordas de corte leva a um desgaste excessivo da ferramenta diminuindo conseqüentemente seu tempo de vida, não ocorrendo esse comportamento nos machos de conformação; os machos de conformação apesar de utilizarem momentos torçores maiores, apresentam um formato bem mais resistente do que os machos de usinagem que apresentam sulcos para passagem de lubrificantes e retirada dos cavacos.

Novosel [22] cita ensaios realizados com machos de conformação em que a vida útil dos mesmos chegou a quase 2 vezes a vida útil de um macho de usinagem. Aliado a maiores velocidades de conformação notou-se um aumento de 35% da produtividade com a utilização de machos de conformação.

2.15. ROSQUEAMENTO POR CONFORMAÇÃO EM BUCHAS FURADAS POR ESCOAMENTO

Kretschmer [6] estudou o comportamento de roscas cilíndricas conformadas e usinadas em buchas formadas pelo processo de furação por escoamento. Ele analisou fatores como a forma do furo obtido por escoamento e suas implicações no rosqueamento por conformação e no rosqueamento por usinagem.

Os testes foram realizados conforme norma DIN 267 - parte 4. A norma determina o teste de resistência das roscas, teste de dureza na região dos filetes, teste de carregamento e o teste de condição de superfície.

As figuras 2.48, mostram a bucha furada por escoamento e posteriormente roscada por conformação nas duas formas testadas de furo, ou seja : com bucha cilíndrica e com bucha

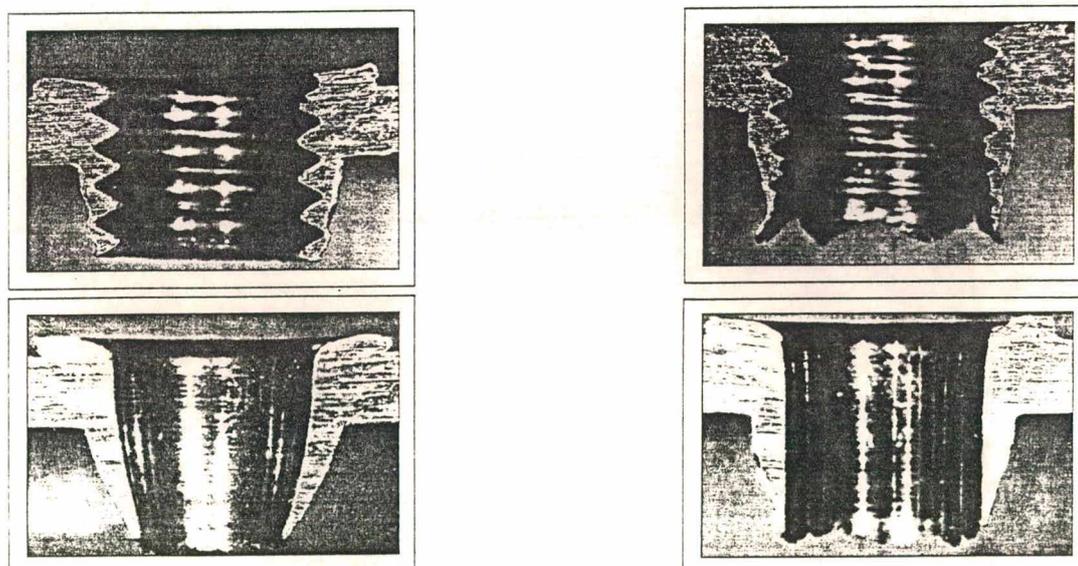


Figura 2.48 - Buchas furadas por escoamento e que posteriormente foram roscadas por conformação

cônica.

Os momentos torçores foram analisados e a figura 2.49 mostra que com o aumento da velocidade de conformação ocorre um aumento do momento torçor. Percebe-se também que os momentos torçores tanto no rosqueamento por conformação quanto no rosqueamento por usinagem em buchas cônicas, apresentam geralmente valores de até 2 vezes os valores encontrados para rosqueamento em buchas cilíndricas. Em compensação o trabalho de conformação é bem mais uniforme na bucha cônica, gerando roscas mais bem formadas.

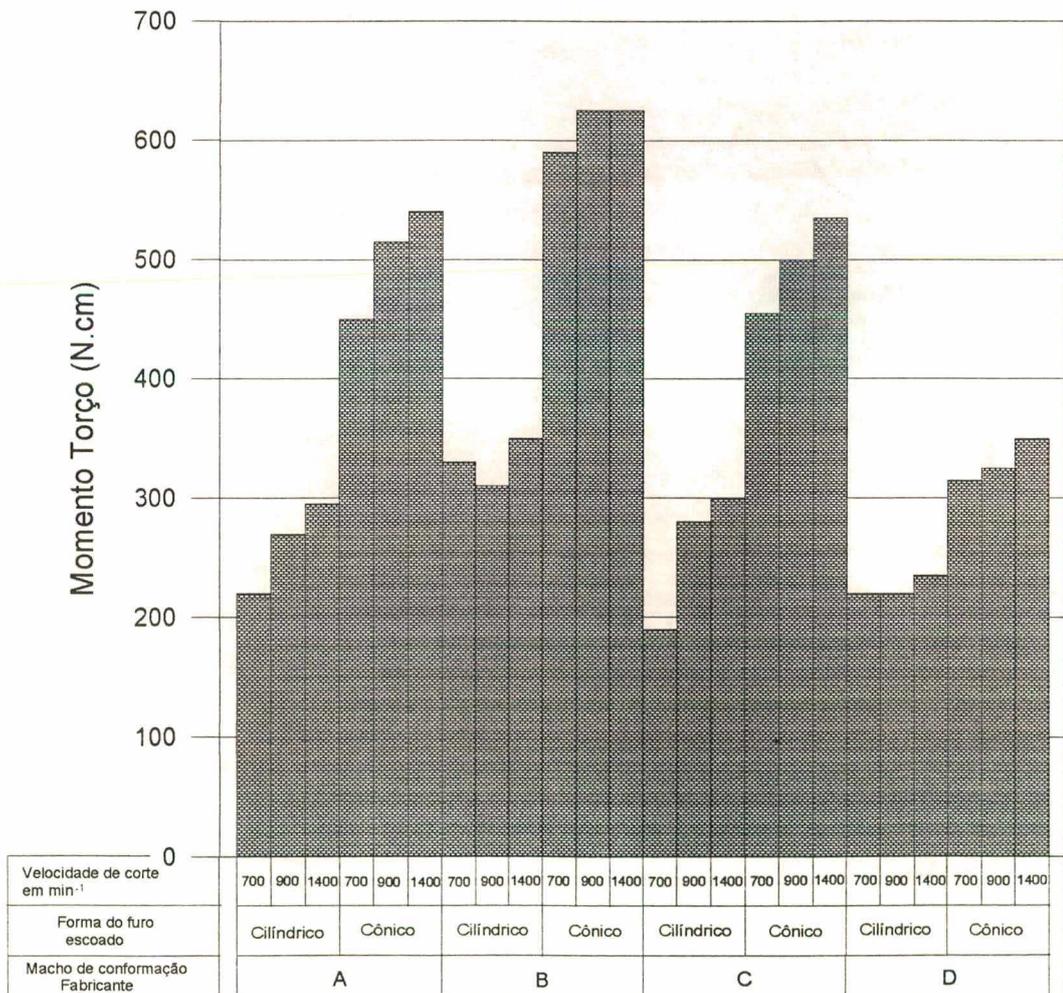


Figura 2.49 - Momentos torçores no rosqueamento em chapas furadas por escoamento

As tolerâncias das roscas obtidas situam-se na classe de tolerância 5H, de acordo com a norma DIN 13. Exceto pelos filetes, a geometria da rosca cilíndrica depende mais da forma da

ferramenta do que da forma do furo inicial.

Nas roscas M6 analisadas por Kretschmer, foram medidas a largura K_b e a profundidade K_t da garra dos filetes. Nas roscas em buchas cônicas os resultados encontrados não ultrapassaram 0,1 mm tanto para K_t quanto para K_b . Já nas roscas produzidas em buchas cilíndricas, a espessura do filete K_b variou de 0,15 a 0,45 mm e a profundidade K_t variou de 0,08 a 0,15 mm.

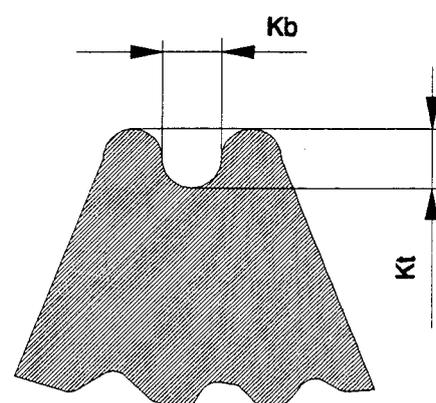


Figura 2.50 - Largura (K_b) e altura (K_t) da garra

Nos testes de resistência de rosca, o valor de 16 kN recomendado pela norma, foi sempre superado. Nos testes de carregamento as roscas foram carregadas com variação de 1 kN a partir de 16 kN, e posteriormente as dimensões das roscas eram testadas com a utilização de um calibrador. Os resultados encontrados foram superiores aos recomendados pela norma, tendo alcançado valores de até 21 kN.

Os testes de dureza do filete mostraram uma elevação de 36% para buchas cônicas e de 22% nas buchas cilíndricas roscadas por conformação.

Em outro artigo Kretschmer [19] estudou a influência da velocidade de conformação. Os resultados demonstraram que o campo de tolerância das roscas depende da velocidade de conformação. Por outro lado ficou demonstrado que esse campo de trabalho é bem estreito. Conclui-se que a precisão de forma da rosca diminui com o aumento da velocidade de conformação. Encontrou-se também a correlação entre a velocidade de conformação e o ângulo de flanco da rosca, o qual diminui com o aumento da velocidade de conformação com simultânea piora da qualidade superficial. Também observou-se que as garras existentes na crista do filete das roscas se fecham com o aumento da velocidade de conformação. Este fato porém não influencia a resistência das roscas. Variações na forma dos machos não levaram a qualquer influência significativa nos resultados.

CAPÍTULO 3

OBJETIVOS DO TRABALHO

Neste trabalho procurou-se abordar temas sobre os processos de furação por escoamento e rosqueamento por conformação, os quais não tinham sido desvendados pela literatura técnica. Também se abordam os aspectos do processo que apresentaram dados conflitantes e obscuros.

O estudo desenvolvido teve como objetivos os seguintes aspectos descritos logo a seguir:

- preencher a lacuna de informações para a aplicação do processo de furação por escoamento com avanços constantes, selecionados diretamente na máquina-ferramenta;
- determinar os pontos característicos do processo de furação por escoamento, para a identificação correta das fases do processo;
- buscar o aprimoramento da técnica de medição dos ensaios utilizados por outros pesquisadores, pois isto traz consigo uma maior confiabilidade dos dados e uma maior rapidez em sua análise;
- analisar o aspecto das rebarbas formadas durante o processo de furação por escoamento, já que nenhum artigo aborda a qualidade dos furos obtidos ;
- desenvolver um estudo sobre o comportamento dos diversos tipos de ferramentas de furação por escoamento existentes no mercado, já que os resultados encontrados nos artigos traziam ferramentas de uma concepção mais antiga ;
- estudar a utilização do processo de furação por escoamento em diversos materiais, ampliando o campo de aplicação para o processo;

- analisar o processo de furação por escoamento utilizando força de avanço constante (F_p), o que levou à realização de ensaios para o estudo desta forma cinemática do processo;

- analisar os desgastes ocorridos na ferramenta, bem como a estrutura metalográfica resultante do processo de furação por escoamento, visto que em outros trabalhos não se obtém informações a respeito destes pontos;

- verificar a constituição provável do material da ferramenta e os principais componentes do lubrificante utilizados na furação por escoamento. Até então, não existiam informações disponíveis a este respeito;

- determinar a resistência das roscas conformadas em furos obtidos por escoamento e comparar com roscas obtidas por usinagem. A falta de maiores informações, até mesmo dos fabricantes, foi a principal causa desse estudo.

CAPITULO 4

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. INFRAESTRUTURA DE EXPERIMENTAÇÃO.

4.1.1. MÁQUINA-FERRAMENTA

Todos os ensaios de furação por escoamento e rosqueamento por conformação foram realizados em uma furadeira radial Csepel Modelo 75/1500¹, sendo que os avanços e rotações foram devidamente calibrados antes da realização dos ensaios. A rotação foi verificada utilizando-se uma luz estroboscópica, enquanto que os avanços foram verificados com um relógio comparador. Os resultados das aferições da rotação se encontram no apêndice D, já que avanços não sofreram qualquer divergência com relação aos valores nominais justamente por serem de acionamento mecânico.

4.1.2. PLATAFORMA PIEZELÉTRICA

Para a medição das forças envolvidas no processo de furação por escoamento (força de avanço e momento torçor) e no rosqueamento por conformação foi utilizada uma plataforma piezométrica KISTLER 9273 instalada sobre a mesa da furadeira radial.

¹Todos os equipamentos utilizados serão devidamente referenciados no Apêndice A

Uma calibração do sistema para medição de forças é necessária para que, tendo-se o levantamento da curva de erros sistemáticos, estes possam ser corrigidos [07 ; 08 ; 10 ; 11].

Para a calibração da força de avanço a plataforma piezelétrica foi mantida sobre uma mesa nivelada e a calibração feita com massas padrão aplicadas sobre a plataforma. Para a calibração dos momentos, a plataforma foi fixada em uma cantoneira a 90° da horizontal e uma barra com um pêndulo foi rigidamente fixada à plataforma, de forma que a aplicação das massas sobre o pêndulo criasse um momento de torção. Com a aplicação de diversas massas, pode-se obter as leituras de forças e momentos no sistema de medição que, através da comparação das leituras com os valores aplicados, permitiu a determinação dos erros sistemáticos (fig. 4.1).

Todo o processo de calibração foi feito com auxílio de um software, que faz um tratamento dos dados, de força e momento permitindo determinar a função transferência do sistema e a curva de erros sistemáticos [41].

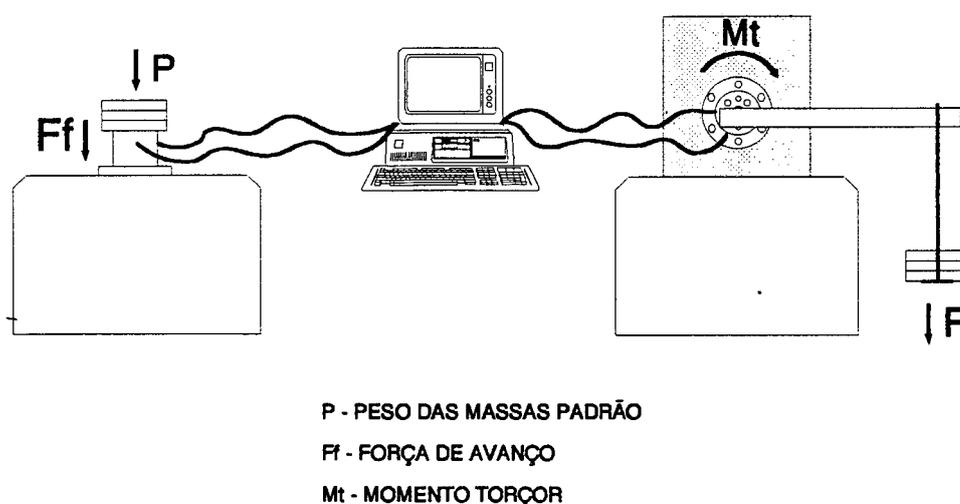


Figura 4.1 - Esquema de calibração do sistema de medição de forças

4.1.3. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Nos ensaios realizados para determinação das fases de processo, uma plataforma piezométrica Kistler 9273 foi montada sobre a mesa da furadeira, para medição das forças de avanço e momentos torçores do processo. Os sinais adquiridos da plataforma eram transportados para um equipamento de aquisição de dados HP 5006, devidamente amplificados. Em seguida os dados eram carregados em um computador HP-85 (figura 4.2).

Um programa de aquisição de dados adquiria 100 pontos de força de avanço e 100 pontos de momento torçor durante a realização de cada ensaio. Em seguida os arquivos eram transferidos para um computador tipo PC, onde dados eram sistematizados em uma planilha e visualizados em um programa de edição de gráficos.

A aquisição de dados para a verificação da força de avanço e do momento torçor durante a furação por escoamento permite acompanhar e avaliar a evolução das características do processo. O número de informações adquiridas durante o ensaio define a resolução das curvas. O sistema HP 85 inicialmente usado apresenta uma razão de aquisição de 0,07/1 por sinal, o que significa uma razão de 0,14/1 entre 2 sinais.

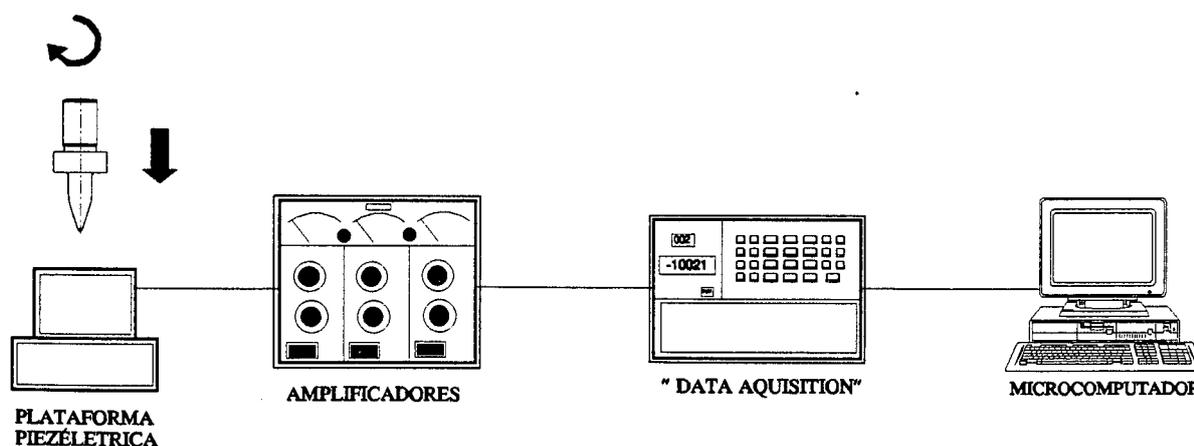


Figura 4.2. Esquema de montagem do experimento I

Em decorrência das curvas dos gráficos terem apresentados pouca precisão, foi desenvolvido um programa específico de aquisição de dados SADA (Sistema de Aquisição de Dados).

Este programa permite a transferência dos dados adquiridos em um osciloscópio para um computador PC. Com um programa complementar as informações podem ser diretamente integradas no texto. O programa está descrito no apêndice E.

O esquema de montagem do experimento apresentado na figura 4.3 foi utilizado no restante dos ensaios realizados. Os equipamentos utilizados são uma plataforma piezométrica Kistler 9273 instalada em uma furadeira radial Csepel 75/1500, responsável pela emissão dos cargas elétricas proporcionais aos esforços, um amplificador, que transforma os sinais para tensão enviando-as para o analisador, responsável pela organização dos dados. Na sequência os dados são gravados em um computador, onde podem ser feitos os gráficos através de um software especialmente desenvolvido (SADA). O analisador de sinais coleta 2048 pontos por canal (2048 pontos para força de avanço e 2048 pontos para momento torçor), independente do tempo selecionado.

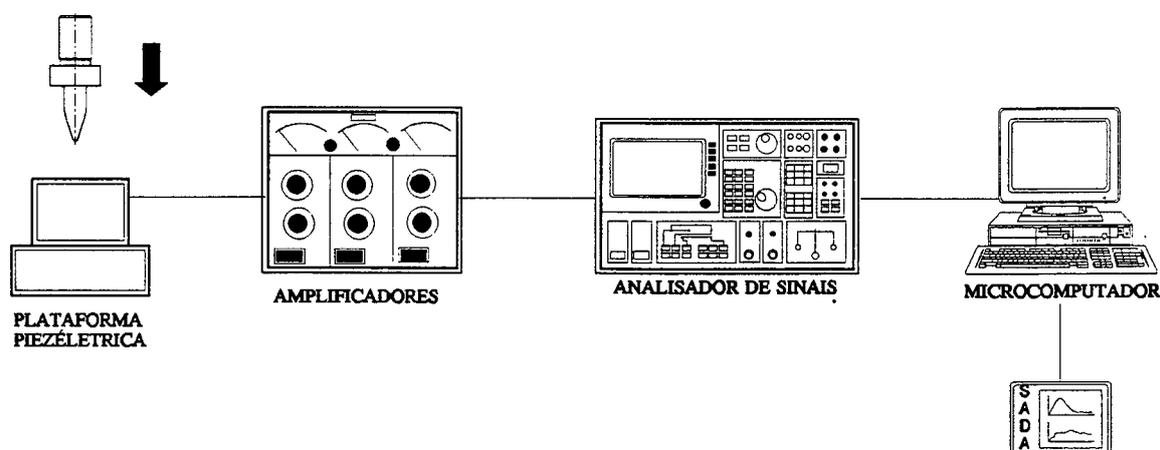


Figura 4.3 - Esquema de montagem do experimento II

Depois de processados pelo programa SADA os pontos são armazenados em um computador PC, onde podem ser visualizados a qualquer momento. O programa compreende um módulo de análise que trabalha com várias funções existentes também no analisador de sinais.

4.1.4. CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS DE PROVA

Os materiais dos corpos de prova utilizados nos ensaios de furação por escoamento e rosqueamento por conformação foram feitos de aço 1020, alumínio, cobre e aço inoxidável. Foram utilizadas diversas espessuras detalhadas para cada parte dos experimentos. A composição química e as características mecânicas de todos os materiais utilizados durante todas as fases dos experimentos estão devidamente registradas no apêndice B.

As dimensões dos corpos de prova, teoricamente, deveriam ter uma dimensão infinita. A impraticabilidade destas dimensões levou-nos a dimensões conforme a fig. 4.4. Ensaios preliminares mostraram que a influência de um furo sobre o outro, efetuados em sequência é pequena (Capítulo 5.1.2). Em todos os corpos de prova procurou-se obedecer a distância mínima entre dois furos de uma vez e meia o diâmetro da ferramenta e a distância mínima entre o furo e a parede exterior do corpo de prova em metade do diâmetro da ferramenta [45].

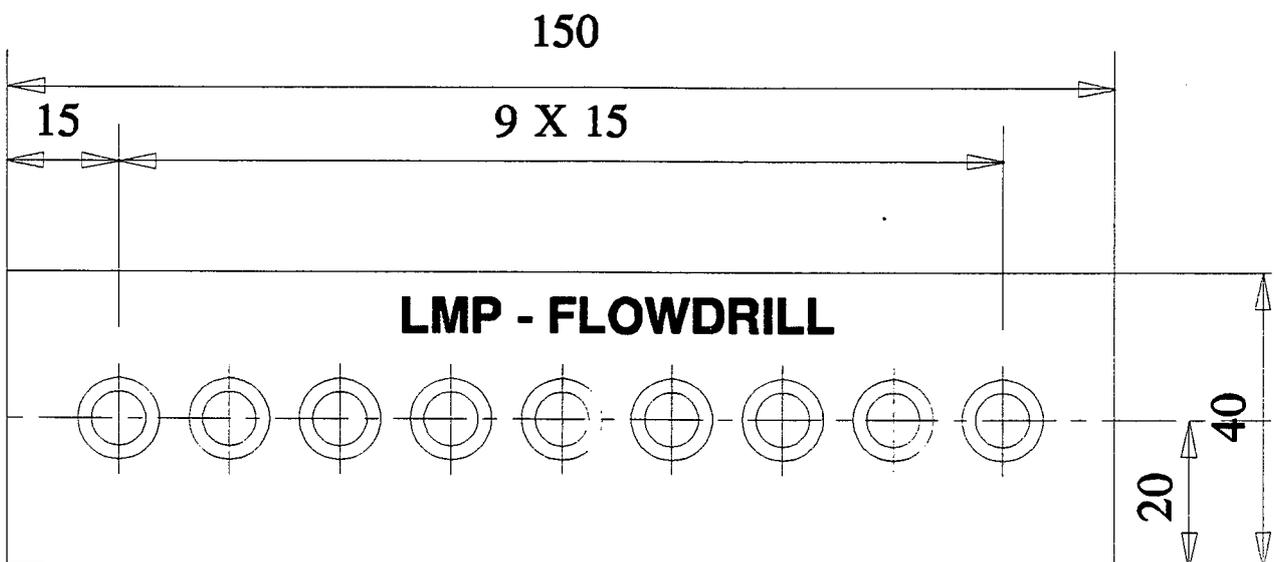


Figura 4.4 - Dimensões dos corpos de prova

4.1.5. DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para a fixação dos corpos de prova sobre a plataforma piezelétrica foi projetado e confeccionado um dispositivo, figura 4.5.

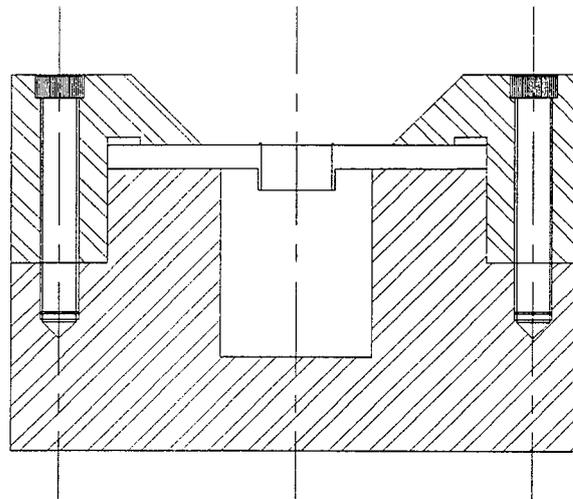


Figura 4.5 - Dispositivo de fixação dos corpos de prova

4.1.6 - FERRAMENTAS UTILIZADAS

Nos ensaios de furação por escoamento foram utilizados diversos tipos de ferramentas. A ferramenta longa e a ferramenta curta, com haste conformadora ou escareadora para tratamento da rebarba superior fizeram parte da maioria dos ensaios. As ferramenta super-curta e curta com ponta estriada também foram testadas. Os diâmetros das ferramentas de furação por escoamento utilizadas como pré-furos para o rosqueamento foram de 7,3 mm para posterior rosqueamento com macho M8; 9,2 mm para roscas M10 e 12 mm. Os diâmetros das demais ferramentas serão descritas em cada grupo de ensaios realizados.

Nos ensaios de rosqueamento foram utilizados machos de conformação M8, M10 e M12 (Fabricante : Flowdrill), também foram utilizados machos de usinagem nas mesmas dimensões.

4.1.7. LUBRIFICANTES UTILIZADOS

Os lubrificantes utilizados durante os experimentos foram recomendados pelo fabricante das ferramentas. Para o processo de furação por escoamento foi utilizada uma pasta lubrificante (Ref. Flowdrill - FD-KS). A cada furo executado a ferramenta era totalmente limpa do lubrificante restante do furo anterior e colocada uma nova camada de lubrificante sobre a ferramenta. No processo de rosqueamento foi utilizado um óleo de corte (Ref. Flowdrill - FT-MA). O óleo lubrificante era colocado na ferramenta durante a realização do processo.

4.1.8. SISTEMAS DE FIXAÇÃO DAS FERRAMENTAS

A fixação das ferramentas de furação por escoamento, para os ensaios de determinação das fases do processo, se deu com um mandril de aperto convencional (fig. 4.6).

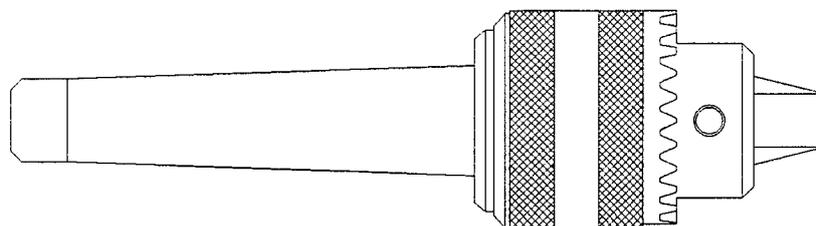


Figura 4.6 - Mandril convencional

Para os demais ensaios foi utilizado um dispositivo de fixação da ferramenta, a base de pinças, desenvolvido pela FLOWDRILL. Entre a parte frontal e o cone morse encontra-se um dissipador de calor na forma de um disco perfurado, como mostra a figura 4.7. Este dissipador de calor evita que o calor gerado no processo atinja os mancais da furadeira.

O dispositivo de fixação por pinças mostrou-se mais eficiente que a fixação com mandril convencional, principalmente para dimensões maiores.

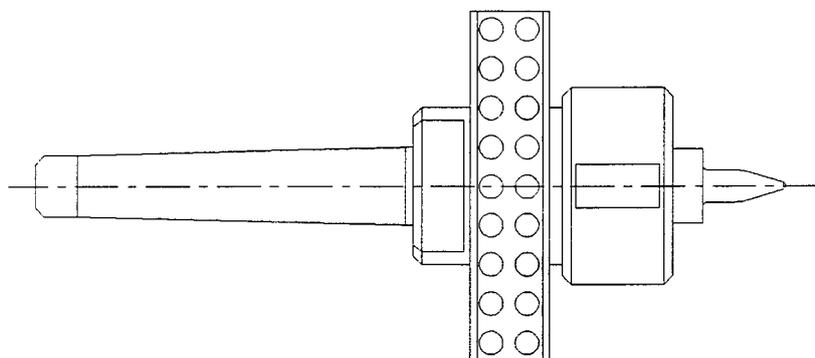


Figura 4.7 - Mandril especial para fixação da ferramenta

A fixação dos machos de conformação e dos machos de usinagem foi realizada com dois tipos de mandris compensadores, próprios para rosqueamento automático em máquina com avanços automáticos (fig. 4.8).

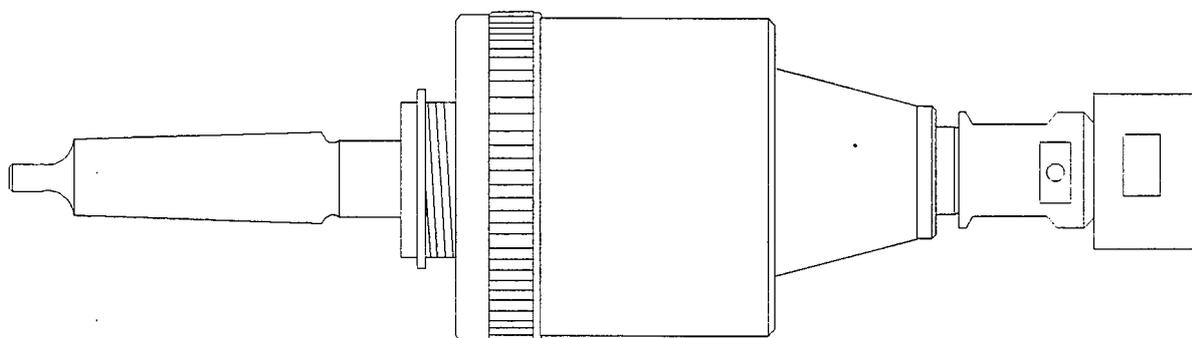


Figura 4.8 - Mandril especial para fixação dos machos de rosqueamento

4.2. PARÂMETROS E VARIÁVEIS DE ENTRADA UTILIZADOS PARA CADA ENSAIO REALIZADO

4.2.1. DETERMINAÇÃO DAS FASES DO PROCESSO DE FURAÇÃO POR ESCOAMENTO (ITEM 5.1)

Na realização destes ensaios foram utilizadas duas ferramentas de furação por escoamento : uma ferramenta curta que executava a furação e comprimia a rebarba superior contra a chapa (fig. 4.9) e uma ferramenta curta com escareador, que retirava por usinagem a rebarba formada na parte superior da chapa, (fig, 4.10). Ambas as ferramentas utilizadas apresentavam um diâmetro de 7.3 mm e o furo resultante era cônico.

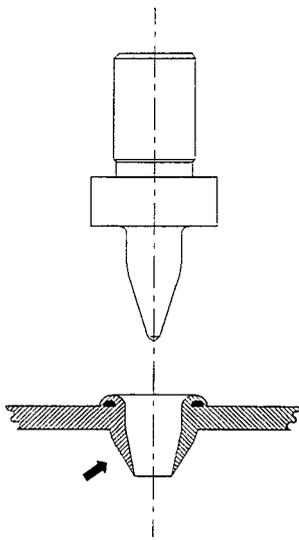


Figura 4.9 - Ferramenta curta

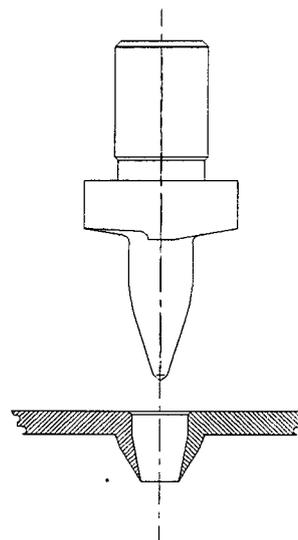


Figura 4.10 - Ferramenta curta com escareador

O material dos corpos de prova utilizados foram chapas de aço 1020 nas espessuras de 2 e 3 mm. As variáveis de entrada utilizadas nestes ensaios estão apresentadas na tabela 4.1, que descreve as rotações e avanços experimentados.

Ferramentas	Chapa 2 mm		Chapa 3 mm	
	Rotação (min ⁻¹)	Avanço (mm/rot)	Rotação (min ⁻¹)	Avanço (mm/rot)
Ferramenta Curta	1960	0,047	1960	0,047
		0,063		0,063
		0,094		0,094
	1570	0,047	1570	0,047
		0,063		0,063
		0,094		0,094
Ferramenta Curta com escareador	1260	0,047	1260	0,047
		0,063		0,063
		0,094		0,094
	990	0,047	990	0,047
		0,063		0,063
		0,094		0,094

Tabela 4.1 - Variáveis de entrada utilizadas - fases do processo

Para aumenta a confiabilidade cada ensaio foi repetido três vezes [46].

4.2.2. ESTUDO DA FURAÇÃO POR ESCOAMENTO COM FERRAMENTA LONGA (ITEM 5.2)

Foram utilizadas chapas de aço 1020 comercial com as mesmas dimensões das chapas da fase anterior. Executaram-se 7 furos em cada chapa.

A ferramenta utilizada foi uma ferramenta longa de diâmetro 12 mm (fig. 4.11). Este tipo de ferramenta possui um colar, como mostra a figura, que comprime a rebarba superior contra a chapa. O furo gerado pela ferramenta é cilíndrico.

Os dados das variáveis de entrada do processo estão relacionados na tabela 4.2. Foi executado um total de 270 furos, abrangendo todas as possibilidades de combinação entre os dados a seguir relacionados. O comportamento do processo de furação por escoamento é muito regular. Isto permite fazer a análise dos resultados em apenas um ensaio por combinação de variável e, quando se suspeita dos dados de alguma condição ensaiada, a mesma é refeita.

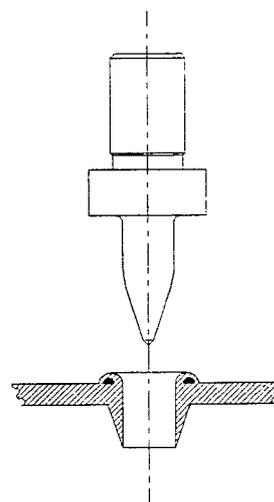


Figura 4.11 -
Ferramenta longa

Espessura da chapa (mm)	Rotação (min⁻¹)	Avanços (mm/rot)
1,2 mm	1960	0,047
1,5 mm	1570	0,063
1,9 mm	1250	0,094
2,6 mm	990	0,125
3,0 mm	790	0,187
3,4 mm		0,250
4,1 mm		
4,7 mm		
6,3 mm		

Tabela 4.2 - Variáveis de entrada utilizadas - ferramenta longa

4.2.3. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS NA FURAÇÃO POR ESCOAMENTO UTILIZANDO DIVERSOS TIPOS DE FERRAMENTA (ITEM 5.3)

A configuração das ferramentas de furação por escoamento é adequada à função posterior do furo. Para furos passantes é empregada uma ferramenta com uma haste cilíndrica longa após o cone de trabalho. As ferramentas para furos que necessitam rosqueamento apresentam uma haste cilíndrica curta, de forma que a parte cônica da ferramenta não transpasse totalmente o furo. Esta configuração permite um melhor dimensionamento da parede rosqueada.

Nos ensaios verificou-se a relação entre os resultados obtidos com uma ferramenta longa de 12 mm (fig. 4.12) e as ferramentas curtas com escareador de 11,7 mm (fig. 4.13) e curta com colar de conformação de 11,5 mm (fig. 4.14).

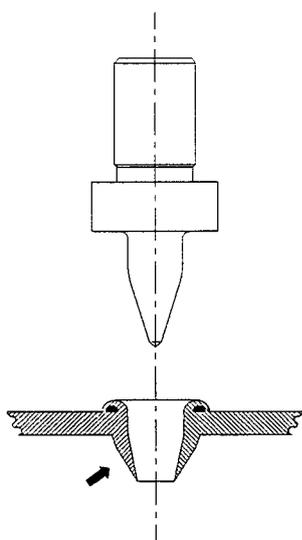


Figura 4.12 - Ferramenta curta

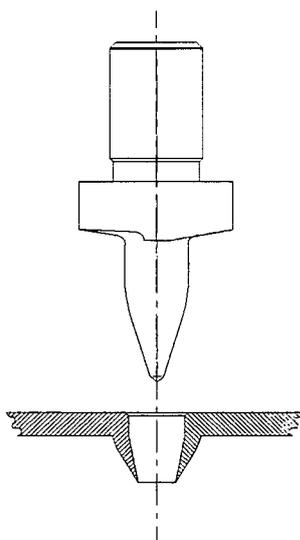


Figura 4.13 - Ferramenta curta com escareador

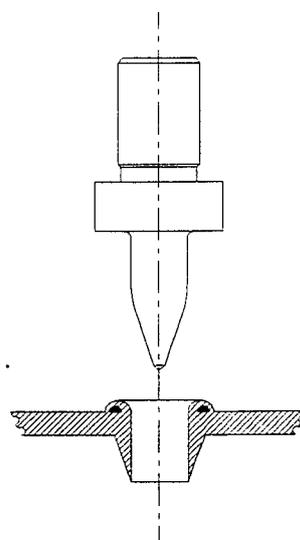


Figura 4.14 - Ferramenta longa

As variáveis de entrada utilizadas para a furação por escoamento com ferramenta curta com escareador e normal estão relacionadas na tabela 4.3.

Variáveis de entrada	Ferramenta curta	Ferramenta curta com escareador
Rotação (min ⁻¹)	1960	1250
	1250	990
	790	790
Avanço (mm/rot)	0,047	0,047
	0,094	0,094
	0,250	0,187
Espessura da chapa (mm)	1,9	1,9
	3,0	3,0
	4,1	4,1

Tabela 4.3 - Variáveis de entrada utilizadas - outras ferramentas

Foram seguidas as recomendações do fabricante quanto à ferramenta curta com escareador. Procurou-se trabalhar em uma faixa de trabalho por volta da metade da faixa de trabalho da ferramenta curta.

Nesta fase de ensaios procurou-se trabalhar com um menor número de condições, mantendo as mesmas variáveis em estudo. Procurou-se identificar as tendências que podiam ser observadas em cada ferramenta.

4.2.4. FURAÇÃO POR ESCOAMENTO UTILIZANDO OUTROS MATERIAIS

A ferramenta utilizada foi a do tipo longa. As chapas utilizadas foram de alumínio, cobre eletrolítico e aço inoxidável².

Material	Espessura da chapa (mm)
Cobre	3,2 mm
Alumínio	3,0 mm
Aço inoxidável	2,0 mm e 3,0 mm

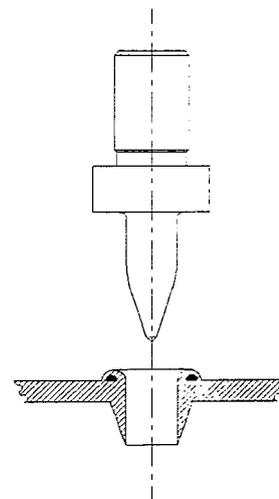


Figura 4.15 -
Ferramenta longa

Tabela 4.4 - Espessura da chapa - outros materiais

Rotações utilizadas (min^{-1})	1960 - 1250 - 790
Avanços utilizados (mm/rot)	0.047 - 0.063 - 0.094 - 0.125 - 0.187 - 0.250

Tabela 4.5 - Variáveis de entrada utilizadas - Outros materiais

²Todos os materiais utilizados serão devidamente referenciados no Apêndice B

Tipo de material	Condutividade térmica (K) W/m.K a 300 K
Alumínio 6063	177
Cobre (Eletrolítico)	401
Aço inoxidável AISI 301	15,1
Aço 1020	60,5

Tabela 4.6 - Condutividade térmica dos materiais utilizados

4.3. CLASSIFICAÇÃO DAS REBARBAS INFERIORES

Foram realizadas análises sobre a qualidade das rebarbas inferiores formadas pelo processo de furação por escoamento. É uma análise qualitativa, que depende muito do operador que as está classificando. No entanto, esta classificação é importante para definir as faixas de utilização que nos permitem uma utilização satisfatória do processo.

A análise da rebarba inferior formada no processo de furação por escoamento permite classificá-las em quatro grupos (fig. 4.16).

A classificação das rebarbas é necessária para uma previsão de processo posterior ao de furação, como por exemplo, o rosqueamento. O critério de classificação é a profundidade dos dentes que se formam na rebarba inferior. No grupo I encontram-se as rebarbas com profundidade de dentes menores que 25%. No grupo II a profundidade dos dentes se situa entre 25 a 50% da altura da rebarba. Nos grupos III e IV encontram-se os dentes com altura até 75% e 100% da rebarba, respectivamente. No grupo IV também são classificados os furos que não chegaram a se realizar completamente.

Os grupos I e II permitem a utilização posterior do furo para confecção de roscas, ao passo que no grupo III as roscas não se desenvolvem mais por completo. Nos furos do grupo IV não é possível executar roscas.

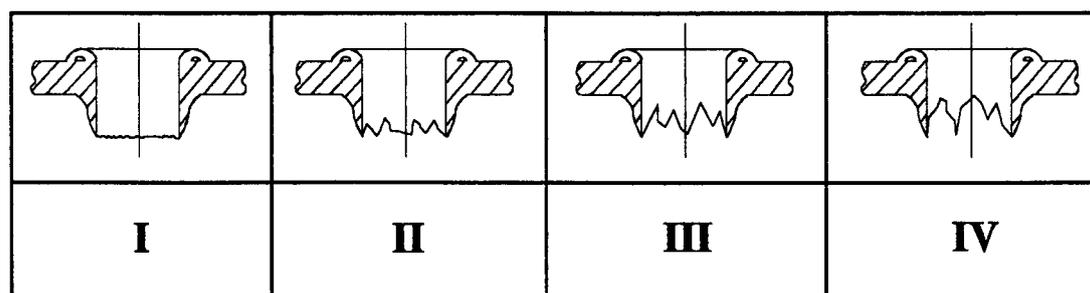


Figura 4.16 - Critério visual de determinação da qualidade da bucha escoada

4.4. ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO E DOS RESULTADOS DE TRABALHO

Todos os dados coletados foram analisados e posteriormente colocados em forma de tabela (exemplo no apêndice C), para avaliação e comparação com os resultados de todos os ensaios realizados.

Os gráficos de três variáveis, como o representado na figura 4.17, mostram as tendências das características do processo. Mas para uma melhor visualização foram isolados e retirados os dados que mais caracterizaram cada experimento em particular e foram feitos gráficos com somente duas variáveis.

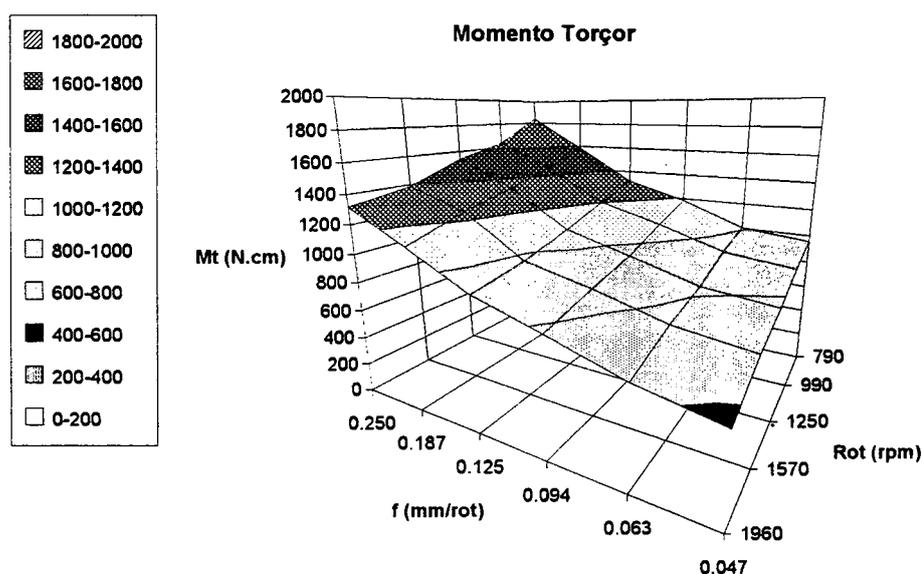


Figura 4.17 - Momento Torçor (Mt) em função da variação da espessura da chapa (e) e do avanço (f).

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO E DOS RESULTADOS DE TRABALHO

5.1. ESTUDO DAS FASES DO PROCESSO DE FURAÇÃO POR ESCOAMENTO E DA INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DO FURO NO CORPO DE PROVA NOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

Através de um estudo preliminar do processo de furação por escoamento, procurou-se conhecer o mecanismo de formação do furo e a faixa de variação das variáveis envolvidas no processo. Foram realizados ensaios preliminares para identificar possíveis influências da posição do furo no corpo de prova nos resultados de força de avanço e momento torçor na furação por escoamento. Durante a realização dos ensaios, foram encontradas dificuldades técnicas de execução dos experimentos, que tiveram de ser resolvidas para viabilizar as próximas atividades.

5.1.1. AS FASES DO PROCESSO DE FURAÇÃO POR ESCOAMENTO

O processo de furação por escoamento pode ser dividido em três fases.

- 1ª Fase - Fase inicial

A fase inicial se caracteriza por uma força de avanço crescente até atingir um valor máximo. No início do contato o material da chapa está frio e resulta em forças de avanço grandes. O momento torçor nesta fase é pequeno.

- 2ª Fase - Fase de escoamento

O material se conforma na direção axial e radial e a força axial necessária decresce gradualmente. O momento torçor cresce com o aumento do diâmetro de contato entre peça e ferramenta. A temperatura alcança seu máximo nesta fase.

- 3ª Fase - Fase de acabamento

Esta fase se caracteriza pelo tratamento da rebarba superior formada pela furação por escoamento. No caso da ferramenta com escareador as forças de avanço e momentos torçores têm uma amplitude pequena. Já na ferramenta que comprime a rebarba contra a chapa as forças de avanço e momentos torçores são maiores.

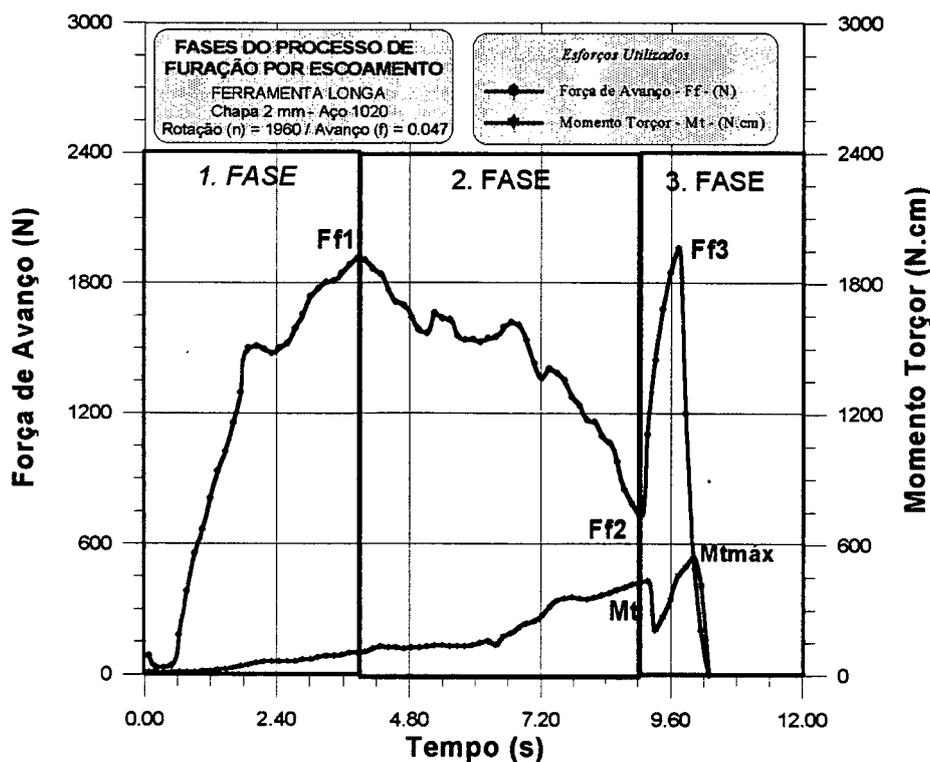


Figura 5.1 - Fases do processo de furação por escoamento

O comportamento das curvas da força de avanço apresentam uma característica bem definida. Pode-se definir os pontos :

- **Ff1** : Caracteriza-se como sendo o ponto final da fase inicial do processo. Neste ponto inicia a fase de escoamento. Sua particularidade é um pico da força de avanço.

- **Ff2** : Caracteriza-se como sendo o ponto final da fase de escoamento e início da fase de acabamento. Sua particularidade é uma força de avanço mínima..

- **Ff3** : Caracteriza-se como sendo o ponto de pico da força de avanço no decorrer da fase de acabamento da rebarba.

Nas curvas do momento torçor podemos caracterizar dois pontos bem particulares:

- **Mt** : Caracteriza-se como o momento torçor máximo alcançado pelo processo antes da fase de conformação da rebarba.

- **Mtmáx** : O momento torçor máximo do processo que ocorre predominantemente na fase de conformação da rebarba.

5.1.2. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DO FURO NO CORPO DE PROVA SOBRE AS FORÇAS DE AVANÇO E MOMENTO TORÇORES ENVOLVIDOS

Foi utilizada uma ferramenta tipo longa, que produz um furo cilíndrico, de 12 mm de diâmetro. O material utilizado foi uma chapa de Aço 1020 com 3 mm de espessura. Foram realizados 7 furos em 4 chapas. As variáveis de entrada utilizadas foram rotação de 1960 min^{-1} e avanço de 0,047 mm/rot. Os gráficos representam os valores médios obtidos por furo e seu desvio padrão correspondente para força de avanço e momento torçor.

- Comportamento da Força de avanço (F_f) com a mudança da posição do furo na chapa

Chegou-se à conclusão que a posição na chapa tem influência nos resultados de F_f . O motivo é a transmissão de calor diferente em cada ponto e até mesmo a temperatura da ferramenta antes de cada furo (fig. 5.2). Esses efeitos secundários não chegaram a influenciar as tendências dos resultados obtidos. Para eliminação desse tipo de influência sugerimos um corpo de prova diferente (fig. 5.3) e também esperar o resfriamento da ferramenta entre um furo e outro. Essas sugestões chegam a dificultar e quase impedir a exequibilidade do estudo, porém esse modelo de corpo de prova foi utilizado em alguns ensaios, onde o número de furos era pequeno, como nos ensaios de resistência a tração de buchas roscadas.

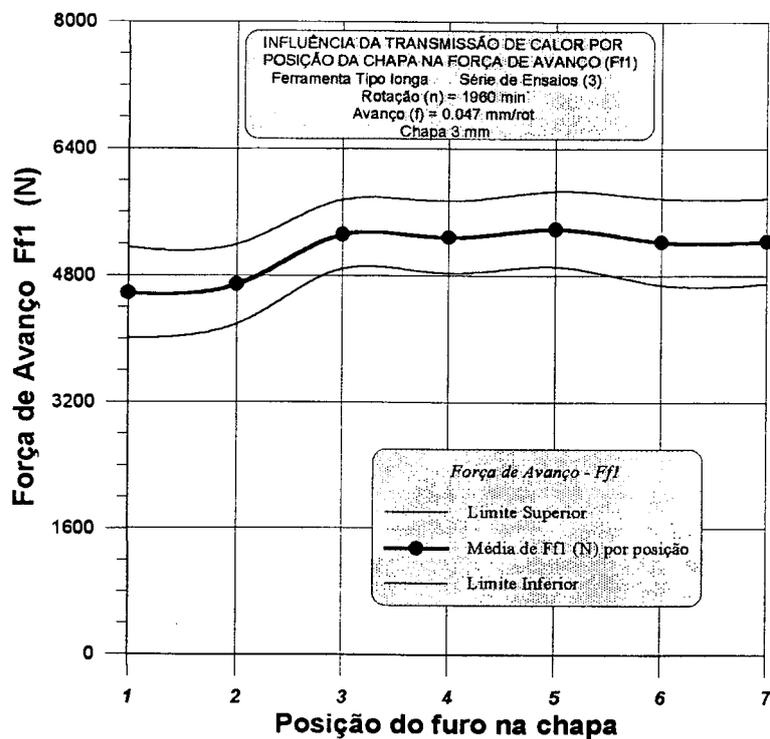


Figura 5.2 - Força de avanço ($Ff1$) x Posição do furo

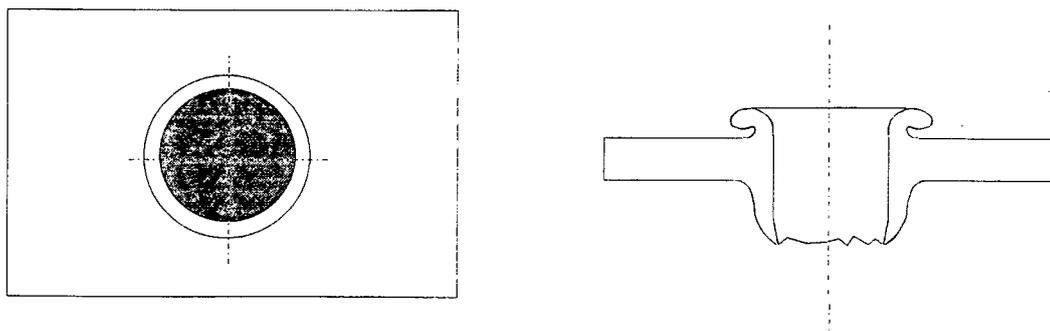


Figura 5.3 - Corpo de prova ideal

**- Comportamento do Momento Torçor (Mt) com a
mudança da posição do furo na chapa**

O momento torçor é muito pouco dependente da posição da chapa. É dependente quase que exclusivamente da área de contato entre ferramenta e o corpo de prova. Por esse motivo o momento torçor varia muito pouco durante quase todos os ensaios.

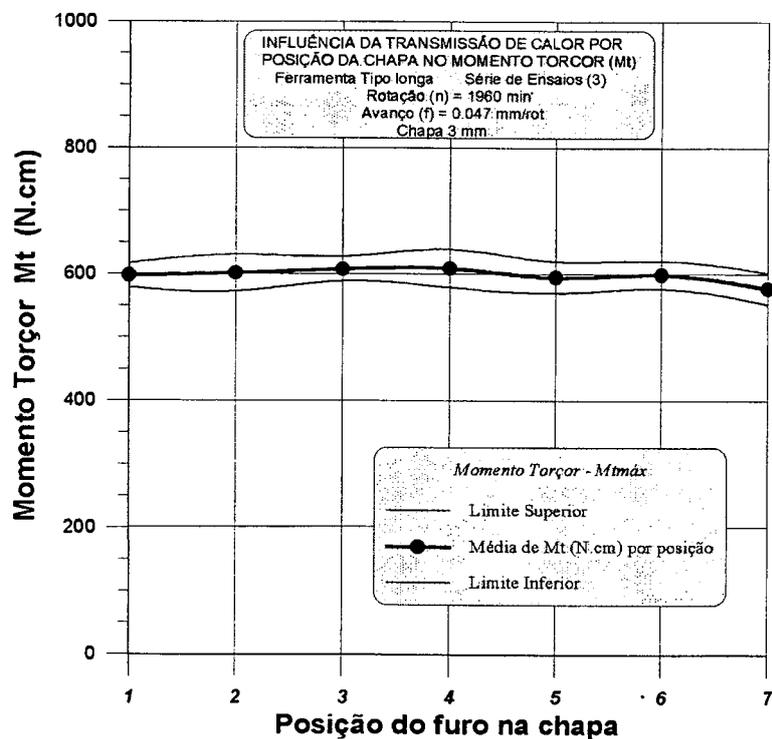


Figura 5.4 - Momento Torçor (Mt) x posição do furo

5.2. INFLUÊNCIA DAS GRANDEZAS DE ENTRADA SOBRE OS CARACTERÍSTICAS DO TRABALHO E SOBRE OS RESULTADOS DE TRABALHO - FERRAMENTA LONGA

5.2.1. DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO A SEREM ESTUDADAS (FORÇAS ENVOLVIDAS)

Abaixo serão descritos os pontos característicos dos gráficos de força de avanço e momento torçor que serão objeto de estudo neste capítulo.

Ponto $Ff1$ - É o pico da força de avanço no final da fase inicial. Representa a força necessária para começar o processo de escoamento do material.

Ponto $Ff2$ - É a menor força de avanço durante o processo. Acontece no final da fase de escoamento do material.

Ponto Mt - É o ponto de maior momento torçor antes da fase de conformação da rebarba superior da bucha fabricada. Ocorre durante a fase de escoamento do material.

Os outros pontos característicos do processo ($Ff3$ e $Mtmáx$) que ocorrem na fase de acabamento do processo, não serão estudados porque suas amplitudes dependem da posição final da ferramenta no furo. Essa grandeza é de difícil padronização devido às várias espessuras de material envolvidas e também a própria posição de final de curso do processo.

Outro dado que será objeto de estudo é a posição de ocorrência das forças $d(mm)$ com relação à ponta da ferramenta. Isso pode nos dar informações sobre a região da ferramenta onde ocorriam os fenômenos constatados.

5.2.2. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS FORÇAS DE AVANÇO DURANTE O PROCESSO

A força de avanço apresenta um comportamento típico, independente da espessura da chapa. O aumento da espessura da chapa faz com que todos os valores característicos da força de avanço sofram um aumento (fig.5.5).

O ponto de início do escoamento se desloca para a direita, isto é, para tempos maiores, em consequência da maior quantidade de calor necessário para atingir a temperatura de escoamento. O aumento da força de avanço para o início do processo de escoamento não é linear com o aumento da espessura da chapa.

Em decorrência de haver uma formação de rebarba superior mais acentuada com o aumento da espessura da chapa, o colar de conformação da ferramenta entra em contato cedo com a mesma para um avanço definido. A força de avanço F_f3 é maior para espessuras de chapa maiores pois a rebarba superior aumenta com o aumento da espessura da chapa.

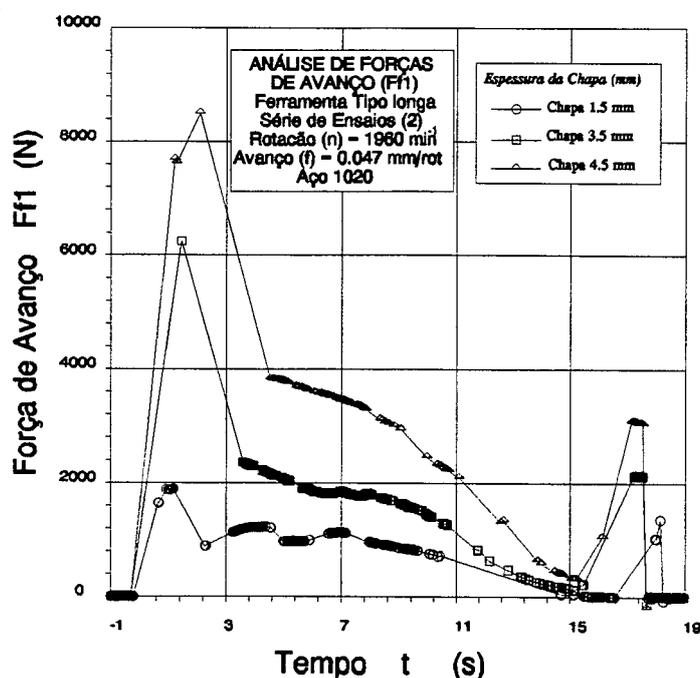


Figura 5.5 - Gráficos de Força de avanço - Ferramenta longa

5.2.3. ANÁLISE DA FORÇA DE AVANÇO (Ff1) NO PUNTO INICIAL DO ESCOAMENTO

- Influência do avanço (f) sobre a força de avanço (Ff1)

As curvas do gráfico da figura 5.6 mostram um aumento da força de avanço F_{f1} com o aumento do avanço e também com o aumento da espessura das chapas. Este aumento se dá principalmente pela maior resistência à penetração da ferramenta, consequência de temperaturas menores na chapa. O aumento maior de F_{f1} provocado pelo aumento da espessura da chapa é devido à melhor dissipação de calor gerado pelo atrito da ferramenta na chapa e também pela maior quantidade de material que deve ser conformado.

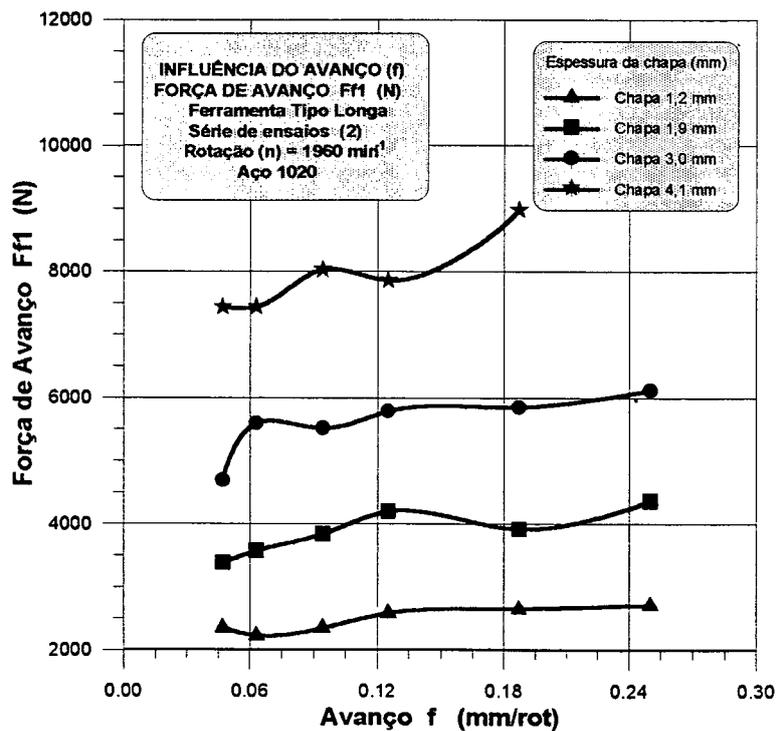


Figura 5.6 - Força de avanço (F_{f1}) x avanço (f)

- Influência da rotação (n) sobre a força de avanço (F_f)

Verificou-se nesse gráfico que o valor da força F_f é muito pouco influenciado pela rotação. Conclui-se que a F_f do processo é dependente quase que exclusivamente da resistência da chapa à penetração da ferramenta, e por conseguinte, quanto maior a espessura da chapa, maiores as forças.

No início do processo o contato da ferramenta com a peça é pontual. Como no eixo da ferramenta a velocidade relativa da ferramenta é nula, o aumento da rotação também não leva a um aumento do calor gerado por atrito. Só após a ferramenta penetrar uma determinada profundidade na peça o diâmetro de contato aumenta, levando a uma geração de calor mais intensa. Até este ponto a penetração pode ser considerada independente da temperatura, e a força de avanço F_f aumenta com o aumento da espessura da chapa.

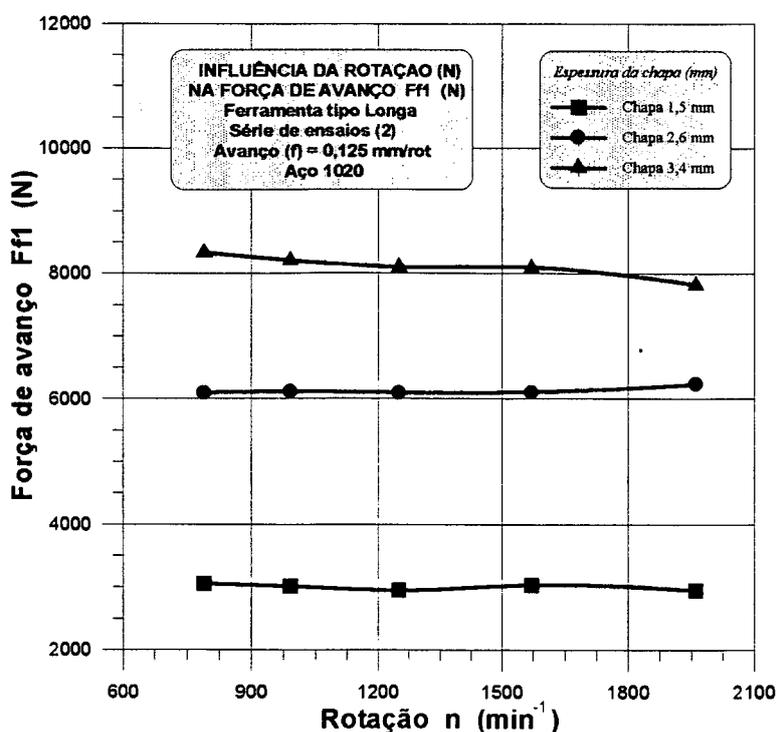


Figura 5.7 - Força de Avanço (F_f) x rotação (n)

**- Influência do avanço sobre o ponto de ocorrência
da força de avanço (Ff1)**

Podemos concluir que com o aumento do avanço ocorre um deslocamento do ponto onde ocorre a Ff1. Esse deslocamento se dá na direção do avanço da ferramenta e ocorre provavelmente pela diminuição da temperatura da peça, ocasionando mais conformação do material que escoamento.

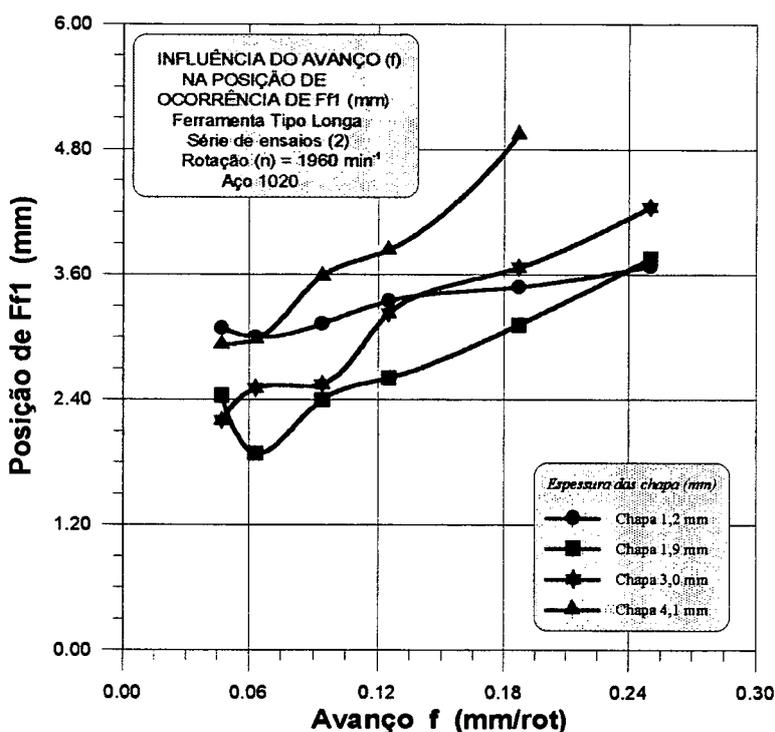


Figura 5.8 - Posição de ocorrência de Ff1 x avanço (f)

- Posição relativa da ocorrência de Ff1 na chapa

Na análise do gráfico acima percebeu-se que nas chapas até 2 mm ocorre um fenômeno de amassamento (fig 5.10). O material da peça é empurrado na direção de avanço e não há rompimento do material, atrasando assim a alta da força de avanço Ff1. Já para chapas maiores que 2 mm, a posição de ocorrência de Ff1 na chapa ocorre preferencialmente da metade inferior da chapa para baixo.

O ponto de início do escoamento da-se somente após uma certa penetração da ferramenta na chapa, necessitando uma temperatura mínima inicial para que o material comece a fluir. Como o calor é gerado pela rotação da ferramenta, um aumento do avanço desloca o ponto de início do escoamento para maiores penetrações da ferramenta na chapa (fig. 5.8). Para chapas mais finas percebe-se que a ferramenta não penetra no material no início do contato, pois a elasticidade da chapa faz com que esta ceda, retardando o início do escoamento (fig. 5.9).

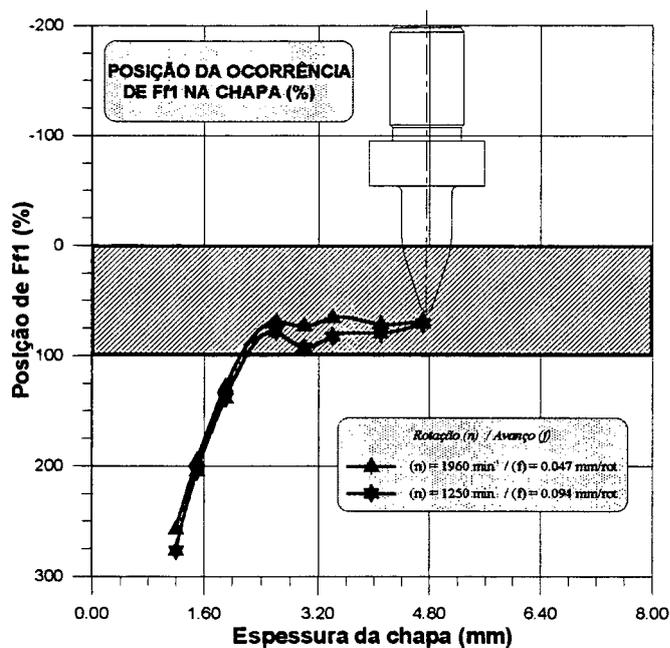


Figura 5.9 - Posição relativa da ocorrência de Ff1 na chapa

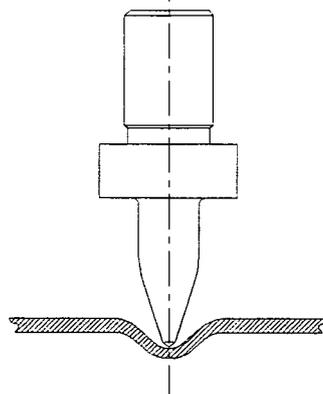


Figura 5.10- Fenômeno do amassamento

- Influência da rotação sobre a posição de ocorrência da força de avanço F_f1

Os resultados mostram que a profundidade de penetração para qual ocorre a força de avanço F_f1 acontece em uma determinada faixa. Os resultados não nos permitem afirmar que a rotação apresente um comportamento uniforme com relação a posição de ocorrência da força de avanço F_f1 para o processo de furagem por escoamento.

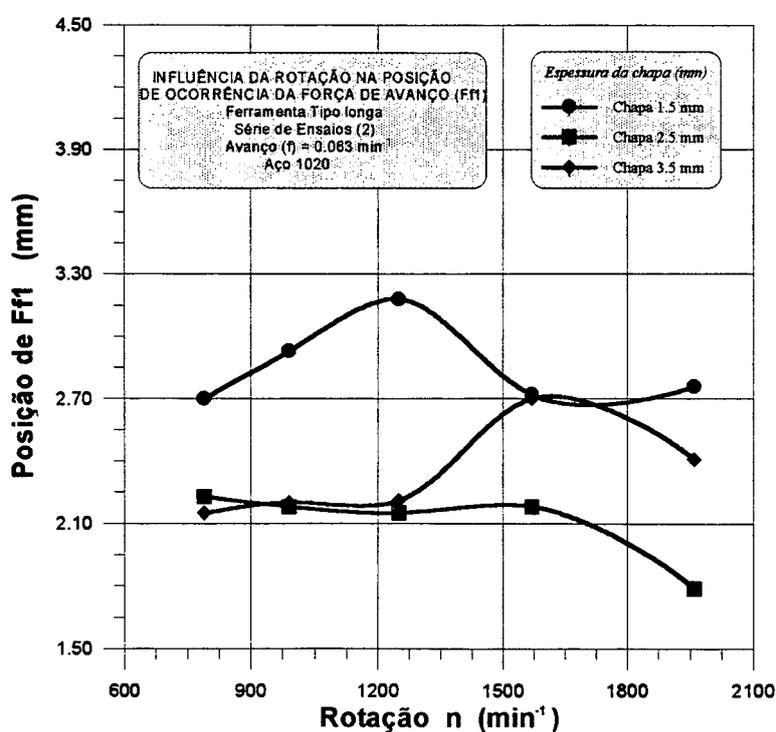


Figura 5.11 - Posição de ocorrência de F_f1 x rotação (n)

5.2.4. ANÁLISE DA FORÇA DE AVANÇO (Ff2) NO FINAL DA FASE DE ESCOAMENTO

- Influência do avanço sobre a força de avanço (Ff2)

As curvas do gráfico da figura 5.12 mostram uma diminuição da força de avanço no final da fase de escoamento com a diminuição da espessura da chapa e com o aumento do avanço. A diminuição da força com a diminuição da espessura da chapa é consequência da menor superfície de atrito entre a peça e a ferramenta.

O gráfico mostra a tendência de que com o aumento do avanço ocorre uma diminuição da força de avanço Ff2. Isto se deve principalmente ao fato de que com avanços maiores existe um menor tempo de contato, diminuindo as forças de avanço mínimas do processo. Neste caso o material sofre uma maior deformação no início do processo.

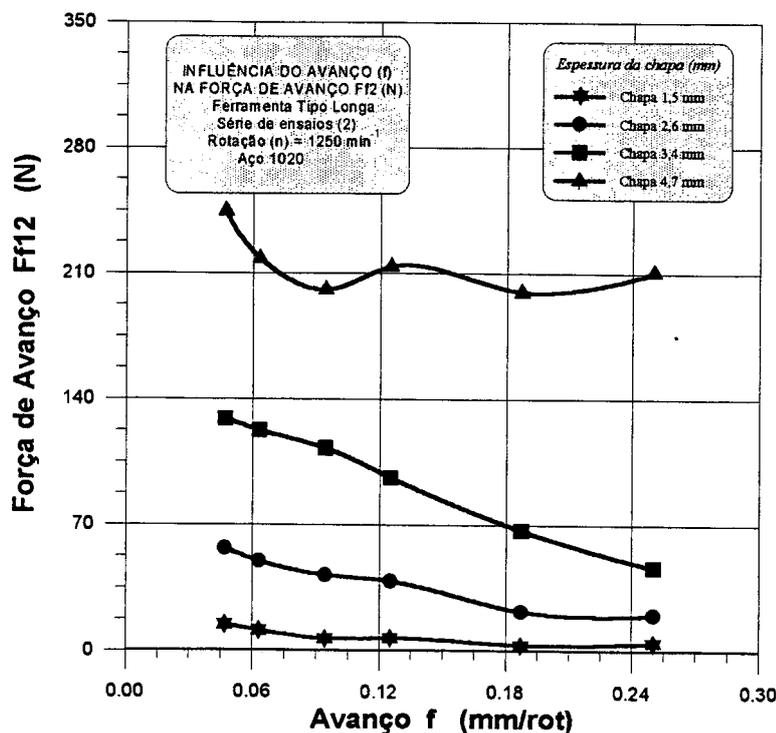


Figura 5.12 - Força de avanço (Ff2) x avanço (f)

- Influência da rotação sobre a força de avanço Ff_2

Com o aumento da espessura da chapa notam-se valores de força de avanço Ff_2 maiores, devido à maior resistência das chapas mais espessas. Já com o aumento da rotação, as forças de avanço Ff_2 tendem a subir e decrescem em rotações mais altas.

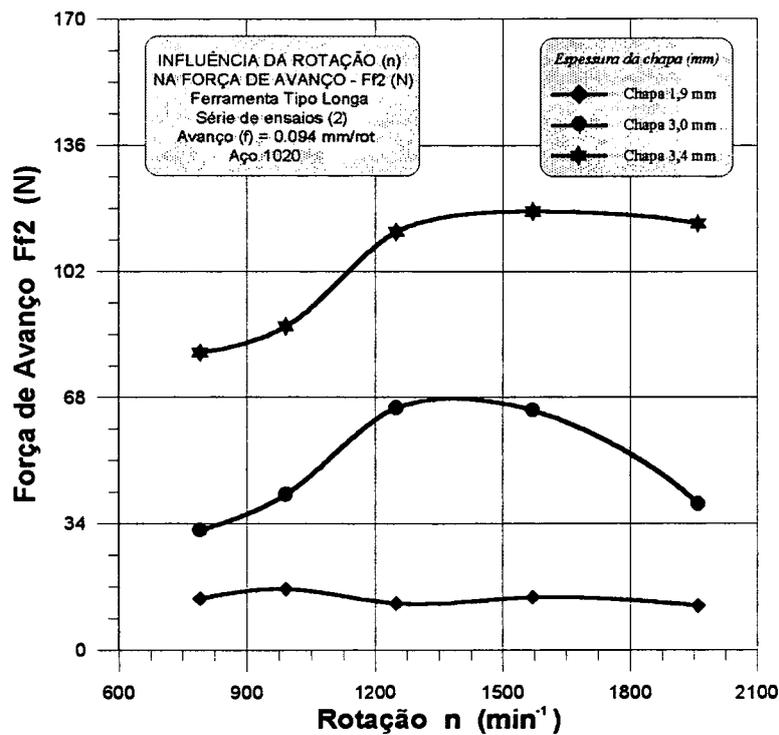


Figura 5.13 - Força de avanço (Ff_2) x rotação (n)

- Influência do avanço (f) sobre a posição de ocorrência de Ff_2

A força de avanço mínima Ff_2 ocorre na passagem da parte cilíndrica poligonal da ferramenta pela chapa, instantes antes do contato do colar da ferramenta com a rebarba superior. Percebe-se que com o aumento do avanço ocorre um deslocamento da posição de ocorrência da força de avanço Ff_2 na chapa em direção do avanço da ferramenta. Isto ocorre por causa do

aumento da deformação elástica da chapa com o aumento do avanço e a diminuição da rebarba superior, consequência da menor quantidade de calor gerado por atrito com avanços maiores

Um aumento da espessura da chapa leva a percursos menores da ferramenta para a ocorrência de Ff2. Tal comportamento ocorre devido ao tamanho crescente da rebarba superior com o aumento da espessura da chapa, bem como à menor deformação elástica da chapa. Como a ferramenta é do mesmo tamanho, o contato da rebarba com o colar da ferramenta vai acontecer mais cedo com o aumento da espessura da chapa.

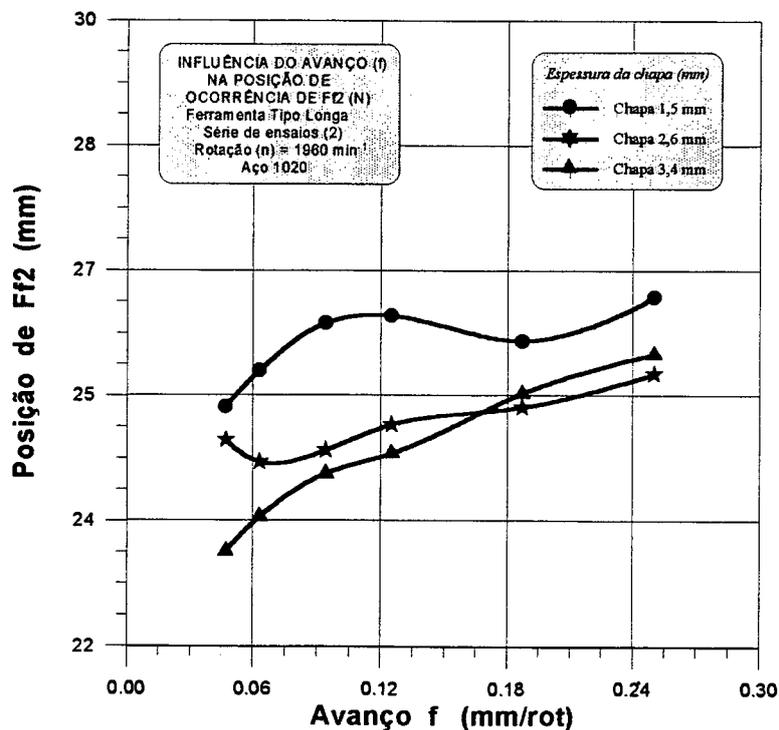


Figura 5.14 - Posição de ocorrência de Ff2 x avanço (f)

- Influência da rotação (n) sobre o ponto de ocorrência de Ff2

Um aumento da rotação leva a um escoamento mais intenso do material da chapa e à diminuição do tempo para a ocorrência de Ff2. Isto se deve à diminuição da altura da rebarba, com a diminuição da rotação, acarretando um atraso do ponto de ocorrência de Ff2. O mesmo comportamento ocorre no caso da variação do avanço. Isto se deve a um aumento da rebarba superior com a diminuição da deformação elástica com o aumento da rotação (fig. 5.15). Na chapa mais fina a deformação elástica só diminui sensivelmente para a rotação de 1900 rpm.

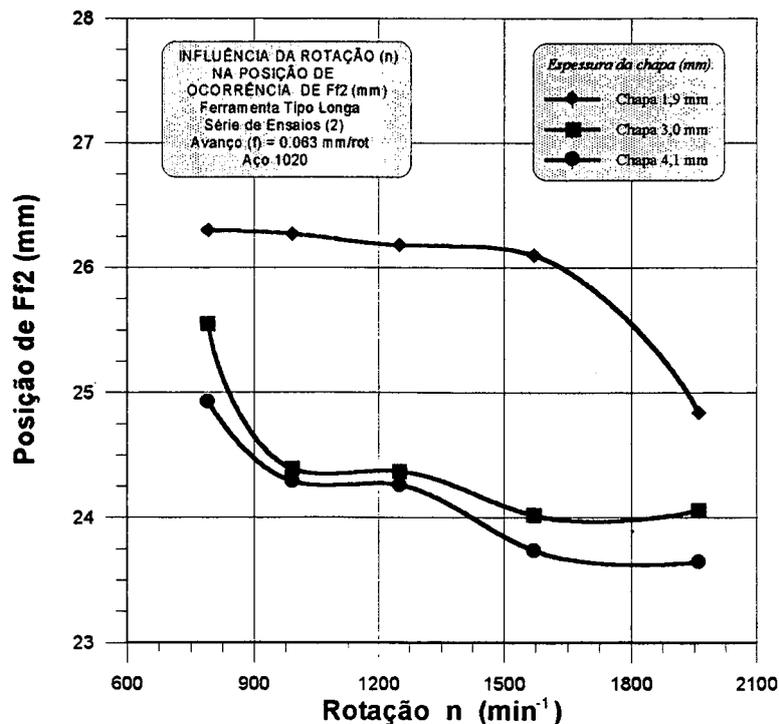


Figura 5.15 - Posição da ocorrência de Ff2 x rotação (n)

5.2.5. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS MOMENTOS TORÇORES DURANTE O PROCESSO

O momento torçor apresenta também um comportamento característico independente da espessura da chapa. Inicialmente o momento torçor apresenta um aumento, cujo gradiente diminui durante a fase de escoamento.

Durante a passagem da parte cilíndrica da ferramenta pela chapa, o momento torçor apresenta uma diminuição acentuada e durante a fase de conformação da rebarba superior ocorre novamente um pico. Este comportamento está diretamente correlacionado com o volume de material que está sendo conformado em cada instante.

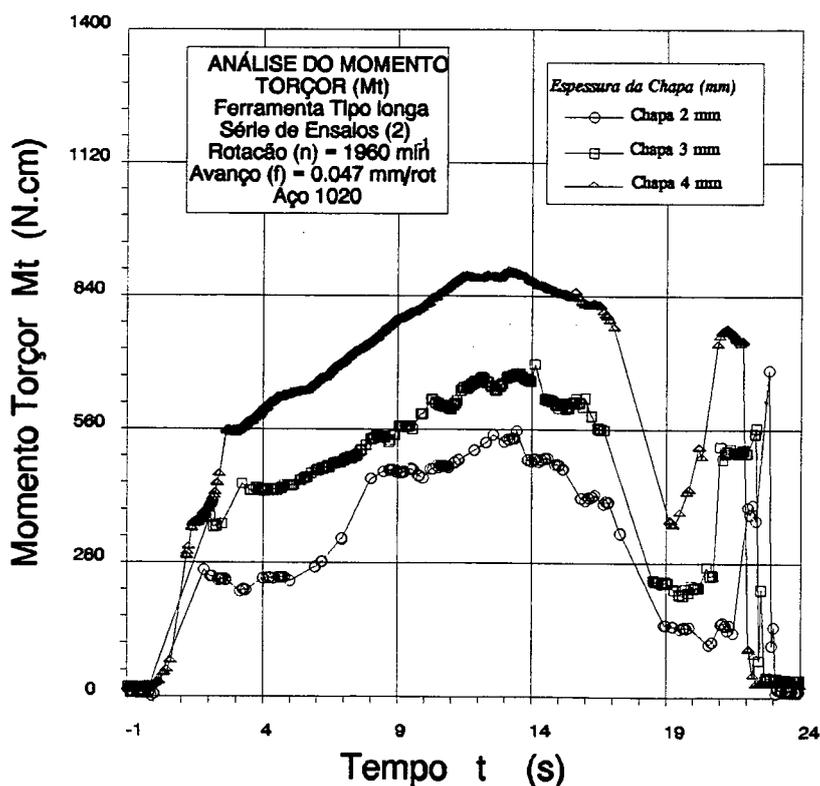


Figura 5.16 - Gráfico de momento torçor - Ferramenta longa

5.2.6. ANÁLISE DO MOMENTO TORÇOR MÁXIMO (M_t) DURANTE A FASE DE ESCOAMENTO

- Influência do avanço (f) sobre o momento torçor (M_t)

Com o aumento do avanço ocorre um aumento nos valores do momento torçor M_t . Isto se deve principalmente a uma menor temperatura da peça decorrente da menor geração de calor, já que o tempo de contato entre a ferramenta e a peça é menor.

Já com o aumento da espessura da chapa acontece um acréscimo do M_t , que pode ser explicado pela maior área de contato entre ferramenta e peça. Nas chapas de maior espessura ocorre a parada do processo devido a necessidade de temperatura na região de trabalho, gerando altos valores de momento torçor, fazendo com que a potência da máquina não seja suficiente para execução da operação. Isso ocorre até mesmo quando o furo é preparado com furo-guia.

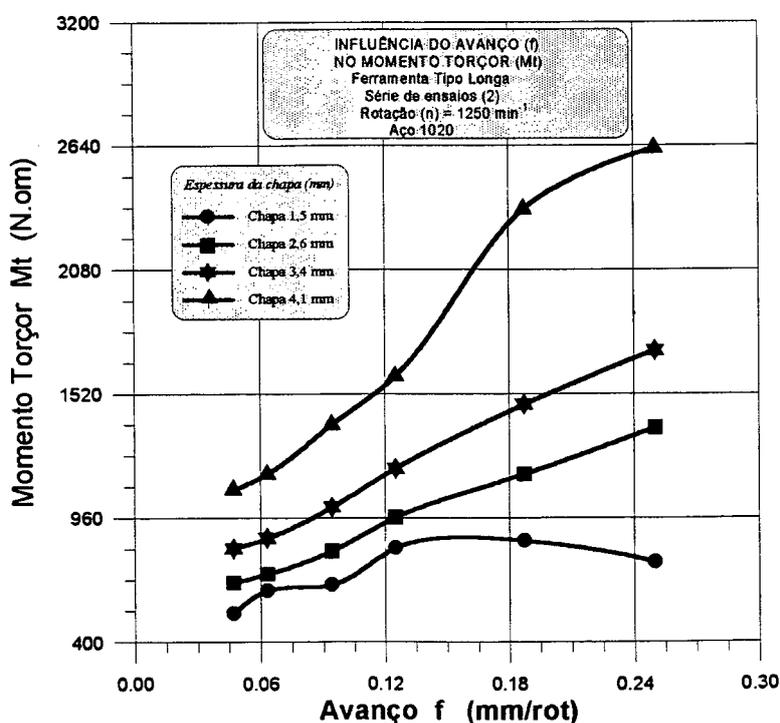


Figura 5.17 - Momento torçor (M_t) x avanço (f)

- Influência da rotação (n) sobre o momento torçor (M_t)

Com o aumento da rotação ocorre uma diminuição do M_t . Isso se deve à maior geração de calor acarretando maiores temperaturas para rotações mais altas. Em decorrência disso existe uma maior facilidade de escoamento do material (fig. 5.18).

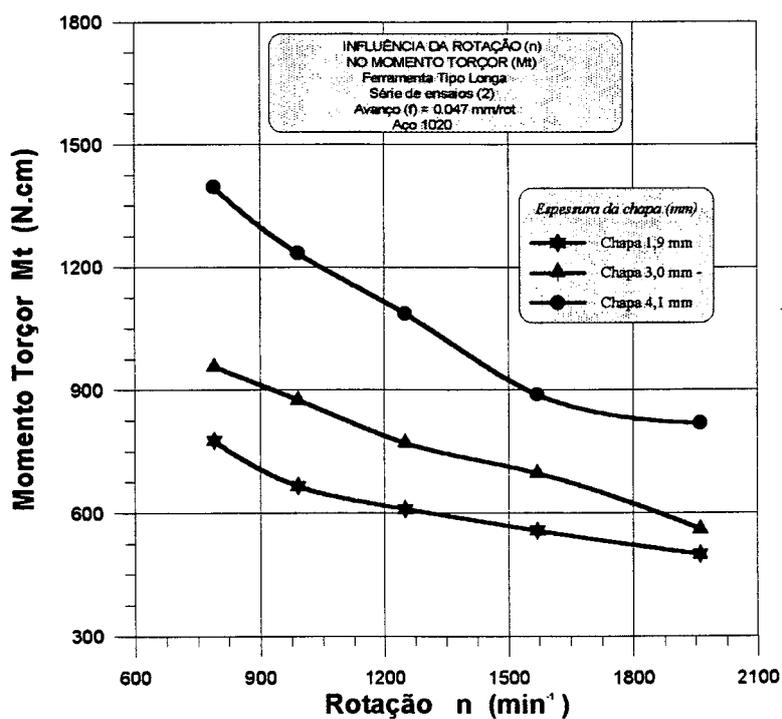


Figura 5.18 - Comportamento do Momento torçor (M_t) em função da rotação (n) da ferramenta

**- Influência da rotação (n) e do avanço (f) sobre a
posição de ocorrência do momento torçor M_t**

O momento torçor máximo M_t durante a fase de escoamento ocorre na transição entre o cone e a parte cilíndrica da ferramenta. É a fase em que ocorre a mudança mais brusca da forma do furo. Esta análise engloba tanto a variação do avanço quanto a variação da rotação. O ponto onde ocorre o momento torçor não tem um comportamento padrão, acontece entre uma faixa de valores.

O momento torçor aumenta com o aumento do diâmetro ativo da ferramenta de furação por escoamento. Quando atinge-se o diâmetro máximo da ferramenta no furo, atinge-se também o momento torçor máximo. Na passagem da parte cilíndrica poligonal da ferramenta pelo furo o momento torçor diminui, pois apenas a força de atrito age sobre a ferramenta, não havendo conformação nesta fase. Dependendo da deformação elástica da chapa, o deslocamento da ferramenta até atingir-se o ponto de momento torçor máximo está situado em uma faixa, não apresentando um comportamento bem definido (fig. 5.19 e 5.20).

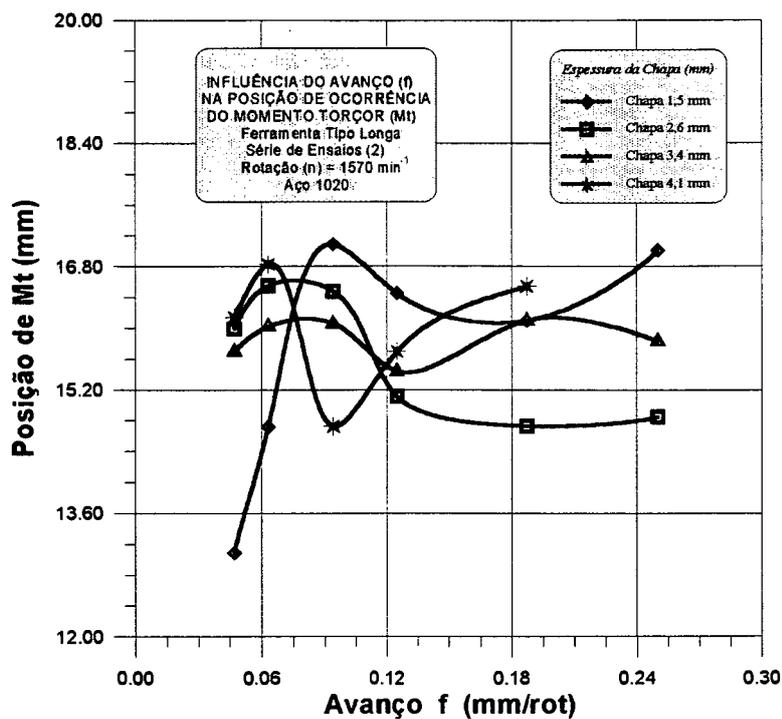


Figura 5.19 - Posição de ocorrência de Mt x avanço (f)

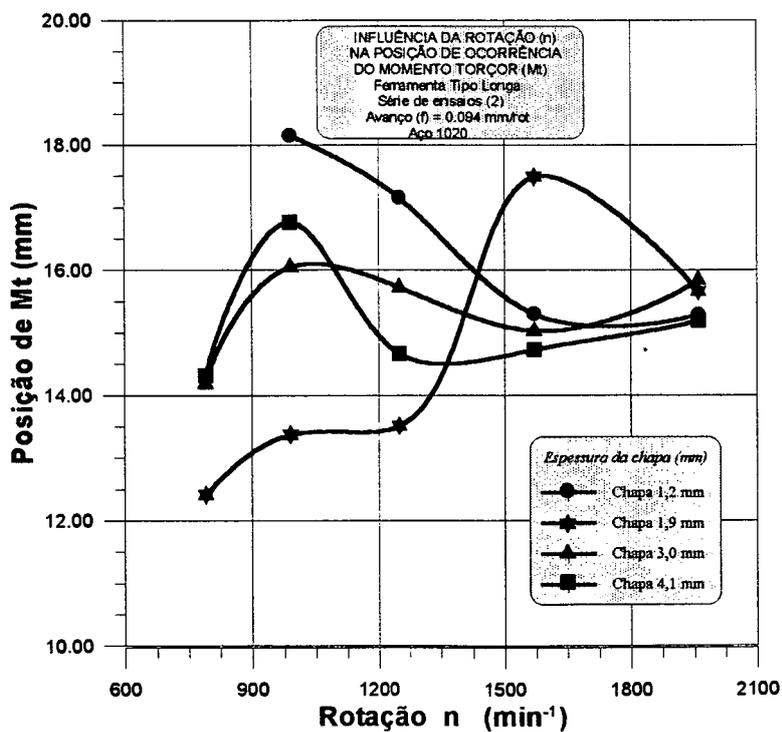


Figura 5.20 - Posição de ocorrência de Mt x rotação (n)

5.2.7. ANÁLISE DA QUALIDADE DAS REBARBAS DOS FUROS

Os dados encontrados nas tabelas abaixo são obtidos pela média aritmética da qualidade da rebarba para cada rotação ou avanço utilizados nos ensaios com ferramenta longa para todas as chapas furadas de espessura idêntica.

- Influência da rotação (n) e da espessura da chapa (e) sobre a qualidade da rebarba formada na furação por escoamento

Espes- sura (mm)	ROTAÇÕES (min ⁻¹)				
	790	990	1250	1570	1960
1,2	4,00	2,83	2,33	1,83	2,00
1,5	4,00	2,83	2,33	1,83	2,00
1,9	2,00	1,83	1,50	1,33	1,16
2,6	2,00	1,83	1,66	1,00	1,50
3,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3,4	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4,1	2,00	2,00	1,00	1,50	1,50
4,7*	2,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6,3*	2,50	3,50	3,00	2,00	2,50

* furo guia = 4,1 mm

Tabela 5.1 - Qualidade das rebarbas - rotação (n) x espessura da chapa (e)

A formação de rebarba na furação por escoamento é decorrente da deformação e do escoamento do material da chapa. Para pequenas espessuras de chapa domina a deformação da chapa. À medida que se trabalha com espessuras maiores, o escoamento do material domina. Um aumento excessivo do material da chapa leva novamente a uma diminuição do escoamento do material. Um aumento da rotação leva a um aumento da temperatura e melhora das condições de escoamento, levando a uma melhora gradativa da qualidade das rebarbas (tabela 5.1).

Conclui-se que tanto em chapas com espessuras menores quanto em chapas espessas tem-se maiores dificuldades técnicas da produção. Nas chapas mais finas, onde não existem condições de temperatura para o escoamento do material, o mesmo é mais conformado que escoado.

Com relação à influência da rotação, chegou-se à conclusão que em rotações mais altas o processo de furação por escoamento ocorre de maneira mais conveniente. Isso se deve à maior temperatura provocada pelas rotações mais altas.

**- Influência do avanço (f) e da espessura da chapa
(e) sobre a qualidade das rebarbas produzidas por
furação por escoamento**

Espessuras (mm)	AVANÇOS (mm/rot)					
	0,047	0,063	0,094	0,125	0,187	0,250
1,2	2,80	2,40	2,00	2,40	3,20	3,40
1,5	2,80	2,40	2,00	2,40	3,20	3,40
1,9	2,00	1,60	1,20	1,00	1,60	2,00
2,6	2,00	2,00	2,00	1,20	1,40	1,40
3,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3,4	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4,1	1,00	1,00	1,00	1,00	2,20	4,00
4,7*	1,00	1,00	1,00	1,00	1,60	1,60
6,3*	1,00	1,60	2,20	3,40	3,40	4,00

* furo guia = 4,1 mm

Tabela 5.2 - Qualidade das rebarbas - avanço (f) x espessura da chapa (e)

Em chapas mais finas os melhores resultados da qualidade dos furos foram obtidos em avanços intermediários pois em avanços maiores a bucha era simplesmente conformada e em avanços baixos, devido às temperatura mais altas, a bucha rachava mais facilmente.

Em chapas mais grossas o furo só não foi executado em condições muito severas. Nessas condições a menor temperatura na região de contato e os altos momentos torçores impediram a conclusão da operação.

Para chapas finas observa-se que um aumento do avanço inicialmente melhora as condições de escoamento, mas para avanços excessivamente elevados a qualidade das rebarbas piora consideravelmente. Para espessuras acima de 2,6 mm um aumento do avanço piora a qualidade das rebarbas, o que se torna mais acentuado para espessuras maiores da chapa. A ruptura da rebarba para espessuras e avanços grandes pode ser explicada pela temperatura baixa do processo.

5.3. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA FURAÇÃO POR ESCOAMENTO UTILIZANDO OUTRAS FERRAMENTAS E OUTROS MATERIAIS (AVANÇO CONSTANTE)

5.3.1. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS NA FURAÇÃO POR ESCOAMENTO UTILIZANDO DIVERSOS TIPOS DE FERRAMENTAS

- Análise do força de avanço durante o processo de furação por escoamento para as ferramentas curtas

Na furação com ferramenta curta o comportamento das curvas de força de avanço diferem na fase final da furação, onde se distinguem em função da conformação ou da usinagem da rebarba superior.

Na ferramenta que comprime a rebarba observa-se um pico de força de avanço durante a fase de conformação da rebarba superior. Já na furação com ferramenta com escareador, que retira por usinagem a rebarba superior, as forças de avanço nesta fase são baixas. O motivo dessa força de avanço pequena é o avanço pequeno para a usinagem. Diminuindo-se a rotação da ferramenta a rebarba superior diminui de tamanho e de temperatura, aumentando a força de avanço nesta fase. Um aumento do avanço também leva a um aumento da força de avanço na fase final da usinagem da rebarba superior.

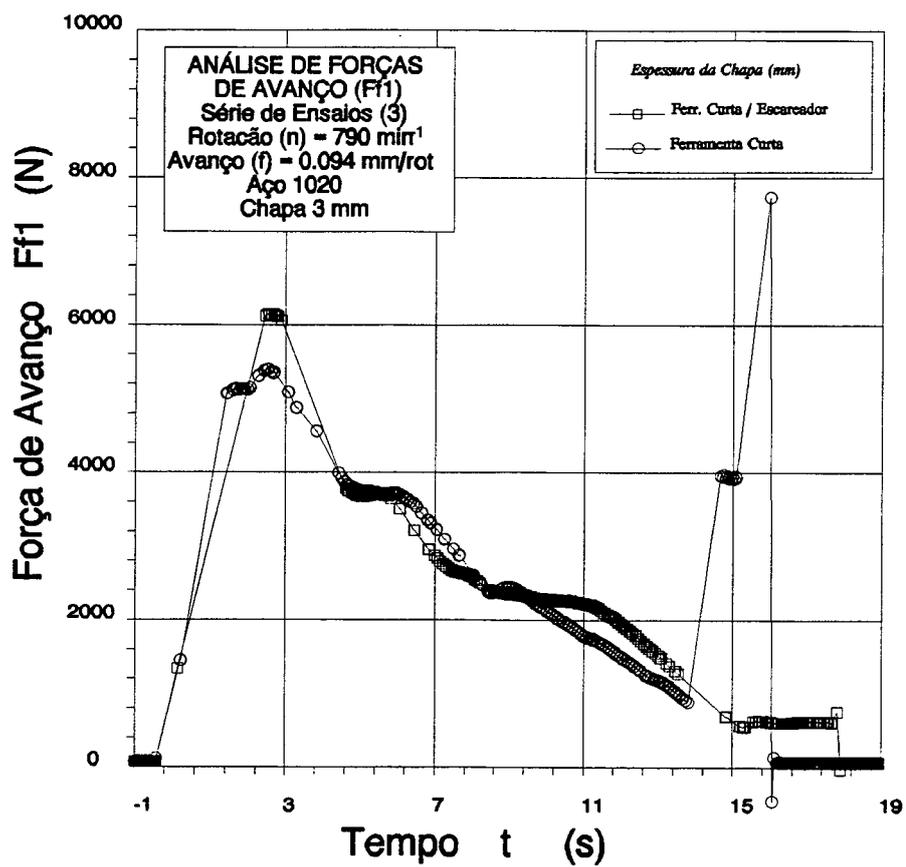
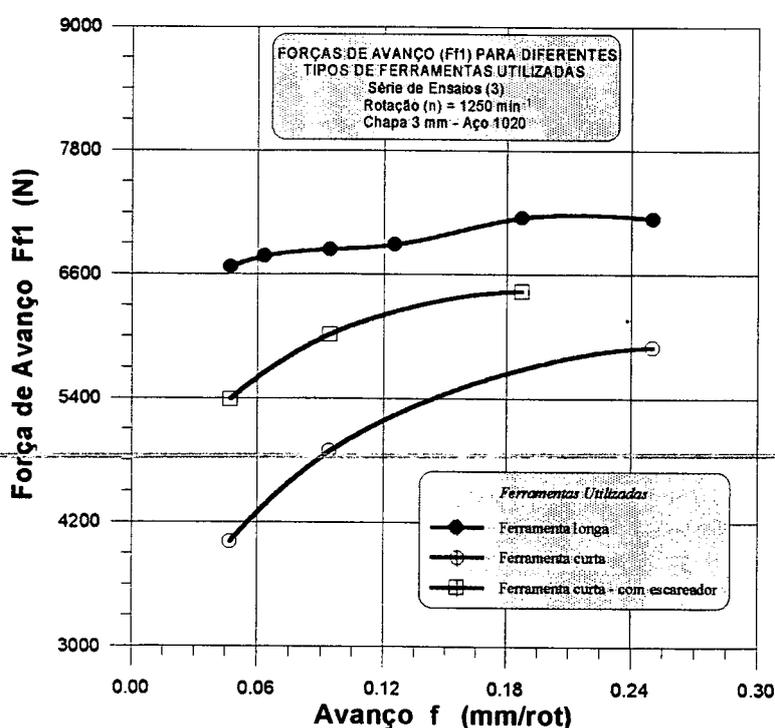


Figura 5.21 - Gráfico da força de avanço (Ff) - Diversas ferramentas

**- Análise da força de avanço (F_f) no início da fase
de escoamento para diversos tipos de ferramentas**

O comportamento da força de avanço máxima (F_f) no início da fase de escoamento é explicado pela diferença dos ângulos de ponta e do cone da ferramenta. Como o ponto de ocorrência de F_f ocorre em algum ponto intermediário da espessura da chapa, o que deve influenciar substancialmente as forças são os ângulos, pois nessa fase está havendo mais conformação que escoamento do material.

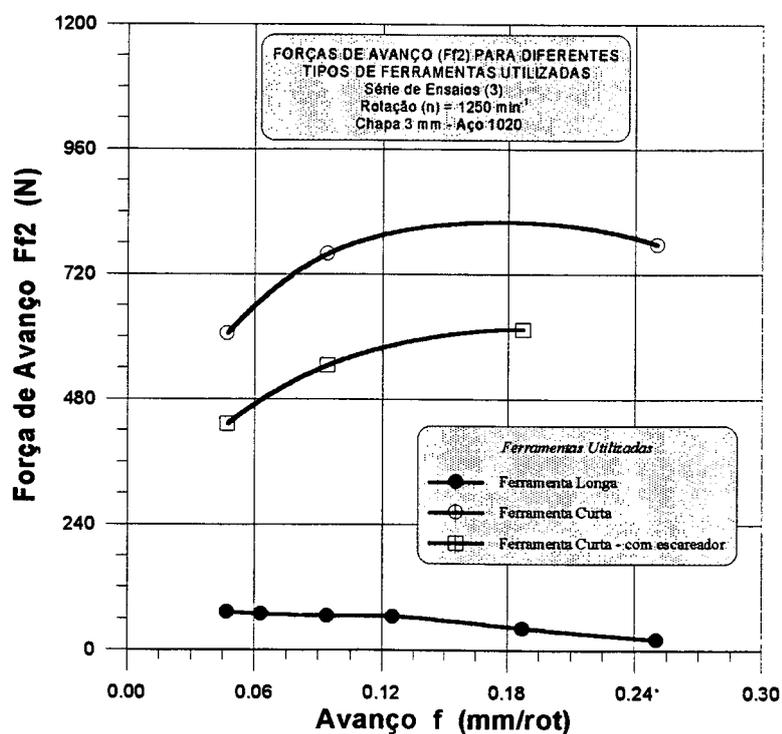
A ferramenta longa apresenta um ângulo de cone de $34^{\circ}40'$, ao passo que as ferramentas curtas apresentam um ângulo de 38° . As ferramentas curtas, mais obtusas, levam a uma geração de calor mais intensa no início da furação, iniciando o escoamento para uma força de avanço máxima mais baixa (fig. 5.22).



**Figura 5.22 - Força de avanço (F_f) x avanço (f)
Diferentes ferramentas**

**- Análise da força de avanço (F_f2) no final da fase
de escoamento para diversos tipos de ferramentas**

O valor da força de avanço na parte final do escoamento é mais baixa para a ferramenta longa. Esta possui uma parte cilíndrica no corpo para a qual não temos conformação e sim ajustagem do diâmetro do furo. Para as ferramentas curtas esta etapa inexistente.



**Figura 5.23 - Força de avanço (F_f2) x avanço (f)
Diferentes ferramentas**

- Análise do momento torçor durante o processo de furação por escoamento para diferentes ferramentas

O comportamento do momento torçor na furação por escoamento com ferramenta curta só difere na fase de conformação ou na usinagem da rebarba superior.

O tempo diferenciado na obtenção dos dois furos é decorrente do percurso percorrido pelas duas ferramentas, do início do contato até a conclusão do furo, serem distintos.

Esta diferença é também encontrada nas próprias ferramentas e também na altura da rebarba deformada e usinada (fig. 5.24).

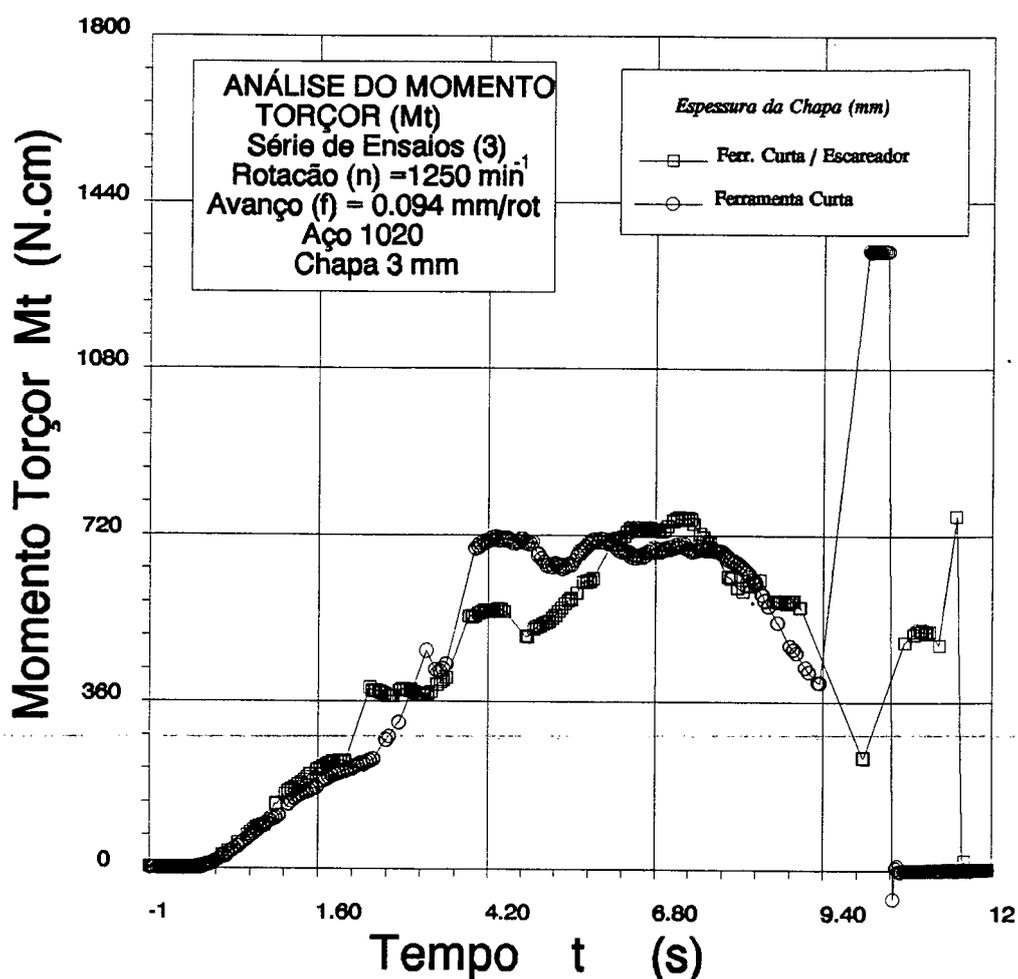
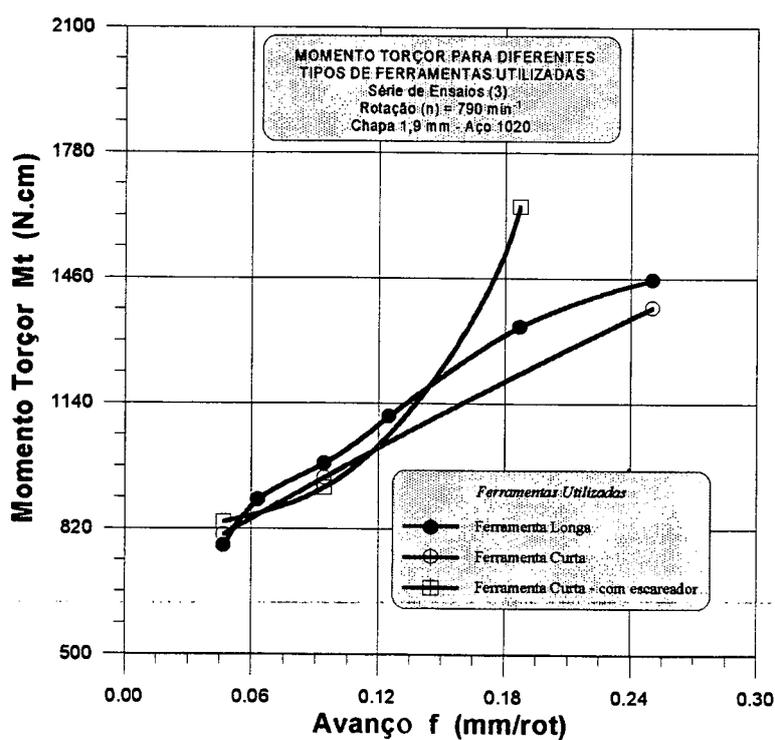


Figura 5.24 - Gráfico de Momento Torçor (Mt) Diferentes ferramentas

- Análise da momento torçor (M_t) máximo durante a fase de escoamento para diversos tipos de ferramentas

O momento torçor praticamente não é influenciado pela forma da ferramenta. Observa-se um aumento maior apenas para avanços superiores com a ferramenta curta com escareador.

Os momentos torçores são dependentes quase que exclusivamente da área de contato entre ferramenta e peça. Como as diferenças de forma das ferramentas são pequenas, os momentos torçores têm um comportamento bem parecido (fig. 5.25)



**Figura 5.25 - Momento Torçor (M_t) x avanço (f)
Diferentes ferramentas**

- Qualidade das rebarbas

FERRAMENTA CURTA

As rebarbas formadas no processo foram analisadas e chegou-se a conclusão que os melhores resultados aconteceram preferencialmente em rotações maiores, sendo que em rotações menores percebeu-se uma grande diferença de qualidade. Os menores avanços também favoreceram a melhor formação da rebarba da bucha escoada.

Espessura da chapa (mm)	Avanço (mm/rot)	Rotação (min ⁻¹)		
		1960	1250	790
1,9 mm	0.047	I	I	III
	0.094	I	I	III
	0.250	II	III	IV
3,0 mm	0.047	I	I	I
	0.094	I	I	I
	0.250	I	I	III
4,1 mm	0.047	I	I	I
	0.094	I	I	I
	0.250	IV	IV	IV

Tabela 5.4 - Qualidade das rebarbas - ferramenta curta

FERRAMENTA CURTA COM ESCAREADOR

Esta ferramenta apresentou uma maior dificuldade técnica de fabricação das buchas com rebarbas de boa qualidade. Percebe-se, neste caso, que se deve combinar dados tecnológicos de fabricação do furo com dados de usinagem da rebarba superior. Mostra-se que em rotações mais altas combinadas com avanços menores conseguem-se resultados satisfatórios.

Espessura da chapa (mm)	Avanço (mm/rot)	Rotação (min ⁻¹)		
		1960	1250	790
1,9 mm	0.047	I	I	III
	0.094	I	I	III
	0.187	III	III	IV
3,0 mm	0.047	I	I	I
	0.094	I	I	I
	0.187	III	III	III
4,1 mm	0.047	I	I	II
	0.094	I	I	II
	0.187	II	III	III

Tabela 5.5 - Qualidade das rebarbas - Ferramenta curta com escareador

Outros parâmetros

Foram analisadas outras combinações de parâmetros e o comportamento se apresentou similar aos resultados obtidos na fase de ensaios com ferramenta longa.

5.3.2. FURAÇÃO POR ESCOAMENTO UTILIZANDO OUTROS MATERIAIS

- Análise do gráfico de força de avanço durante o processo para o cobre, alumínio e aço 1020

Percebe-se que as forças de avanço necessárias para desenvolver o processo de furação por escoamento estão intimamente ligadas à condutividade térmica de cada material. Nota-se que o cobre tem uma condutividade térmica muito alta, o que significa que o calor gerado por atrito se transmite facilmente, diminuindo a temperatura na região de trabalho e dificultando o processo. Já com o aço 1020 ocorre o contrário.

O alumínio empregado nos ensaios é de baixa resistência (6063). Mesmo assim, em decorrência da diminuição do calor, a força de avanço durante a fase de escoamento é da ordem de grandeza do aço 1020.

Os pontos de forças de avanço (F_{f1}) no início da fase de escoamento do material, estão ligados às características mecânicas de cada material.

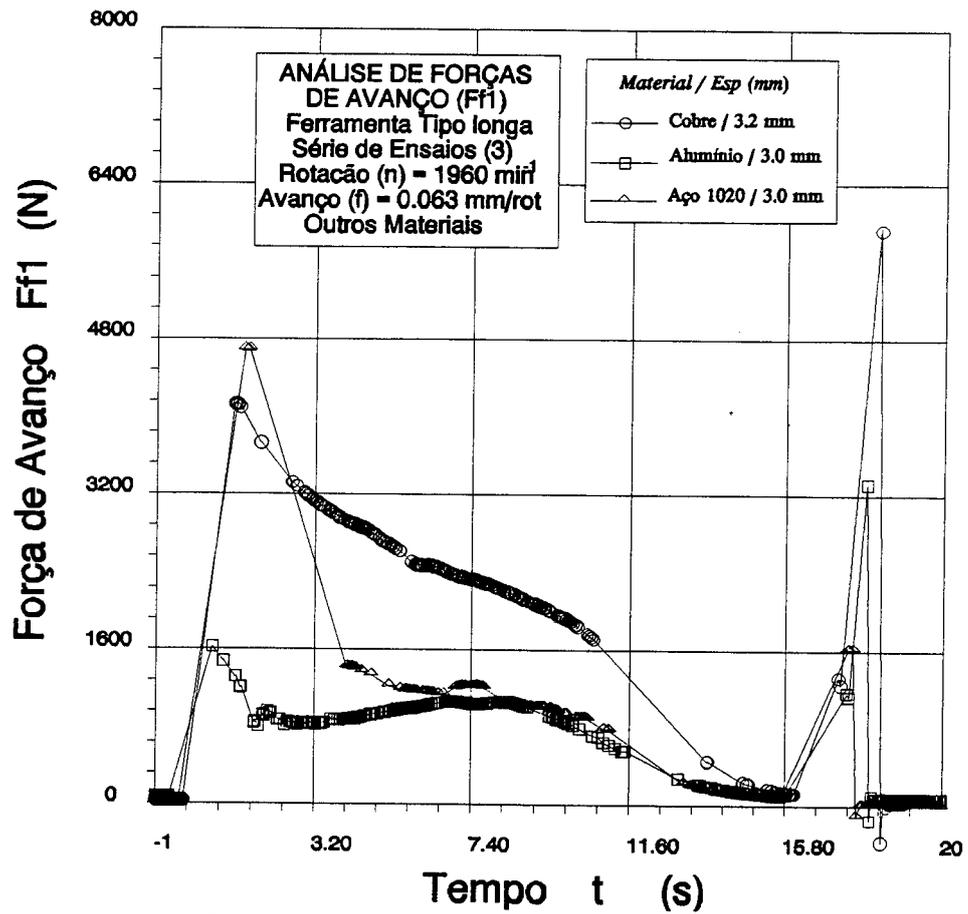
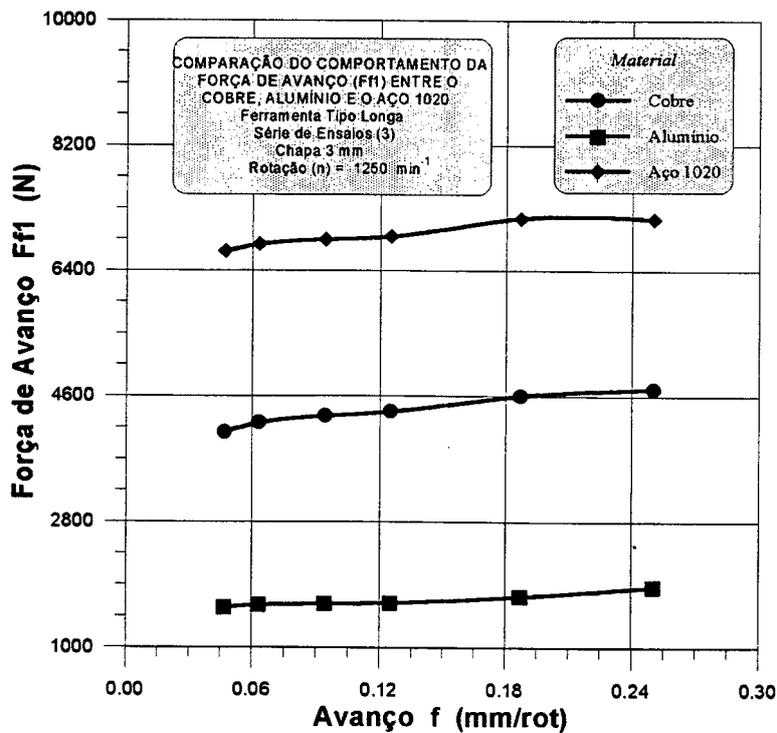


Figura 5.26 - Gráfico da Força de avanço (Ff)
Cobre - Alumínio - Aço 1020

- Comparação da força de avanço (F_f) no início da fase de escoamento para cobre, alumínio e aço 1020

Como havia sido comentado anteriormente, as forças de avanço (F_f) dependem das propriedades mecânicas e físicas de cada material e são bem variáveis. Nota-se que o aço necessita de forças bem maiores que os outros materiais estudados, justamente por apresentar características mecânicas mais elevadas.



**Figura 5.27 - Força de Avanço (F_f) x avanço (f)
Cobre - Alumínio - Aço 1020**

- Comparação da força de avanço (Ff_2) no final da fase de escoamento para cobre, alumínio e aço 1020

O comportamento da força de avanço (Ff_2) para o cobre é bem explicado pelo fato de que o calor gerado na região de contato é bem transmitido para as regiões adjacentes, dificultando o processo e aumentando as forças de avanço. Já o alumínio necessita de menores forças de avanço para completar o processo, pois além das características mecânicas, o calor gerado é dissipado com maior dificuldade do que no cobre ou no aço.

Para o aço, mesmo sendo o material de maior resistência mecânica, encontramos as menores forças de avanço na fase final de escoamento.

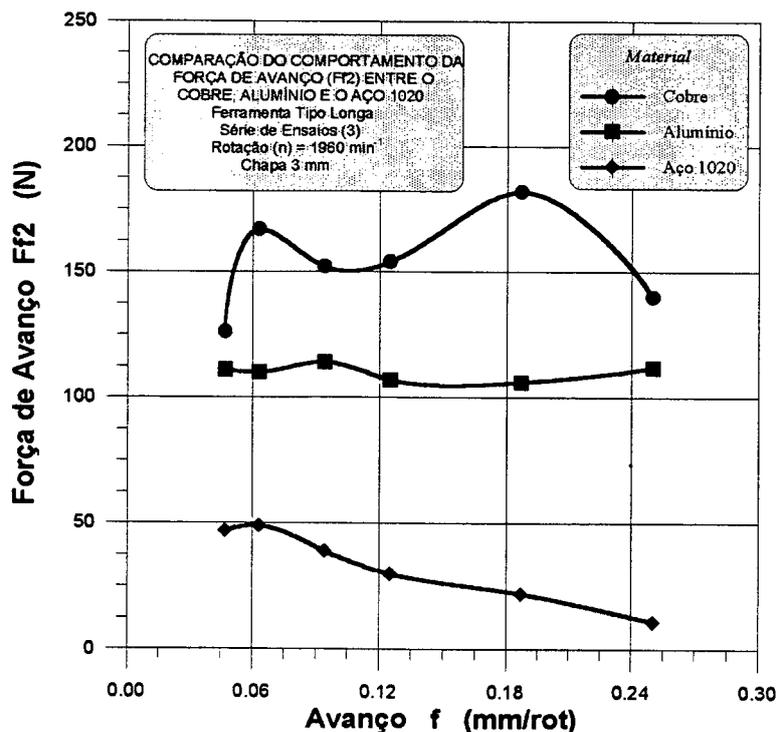


Figura 5.28 - Força de avanço (Ff_2) x avanço (f)
 Cobre - Alumínio - Aço 1020

- Análise do gráfico de momento torçor (M_t) durante o processo para o cobre, alumínio e aço 1020

Os gráficos de momento torçor dos diferentes materiais apresentam um comportamento bem similar, pois dependem basicamente da área de contato entre a ferramenta e a peça.

As diferenças encontradas podem ser explicadas pelas diferentes propriedades mecânicas de cada material em particular.

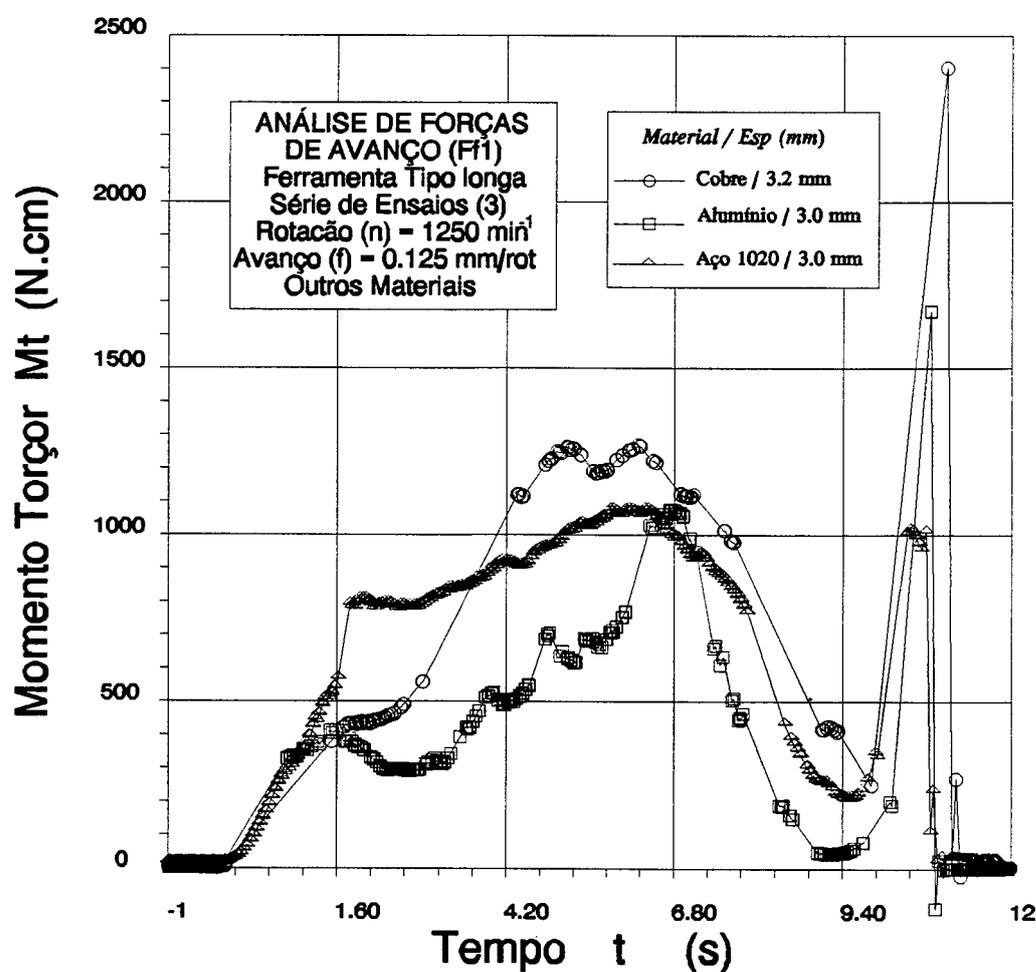


Figura 5.29 - Gráfico do Momento Torçor (M_t) - Cobre - Alumínio - Aço 1020

- Comparação do Momento Torçor (M_t) máximo durante a fase de escoamento para cobre, alumínio e aço 1020

O cobre e o alumínio apresentam um comportamento bem atípico. Para avanços maiores ocorre um queda dos valores do momento torçor, sendo muito mais visível no alumínio. Já o aço apresenta um comportamento progressivo do momento torçor com o aumento do avanço.

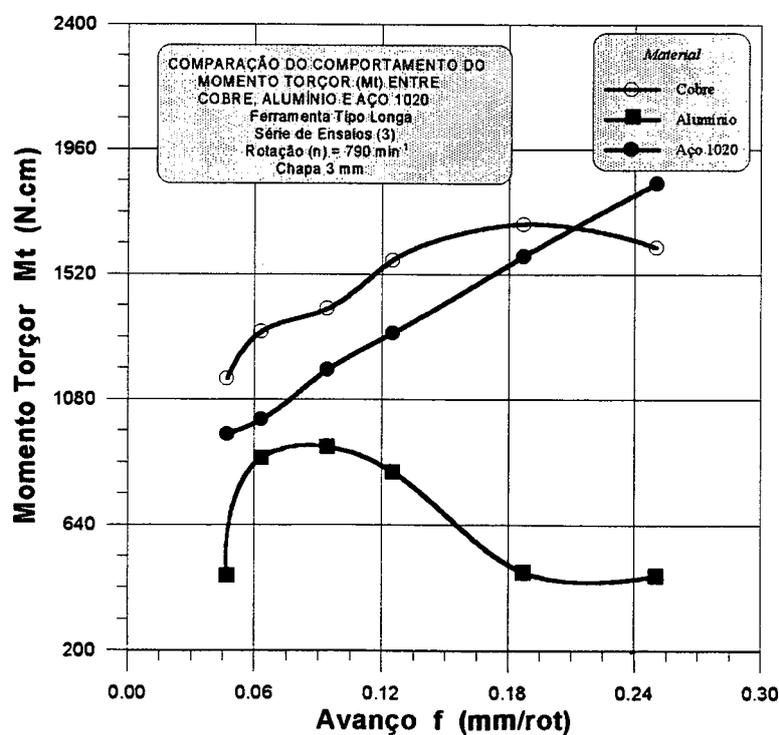


Figura 5.30 - Momento Torçor (M_t) x avanço (f)
 Cobre - Alumínio - Aço 1020

**- Análise do gráfico de força de avanço durante o
processo para o aço inoxidável e aço 1020**

A furação de aço inoxidável mostra um comportamento semelhante ao aço 1020. Apesar do aço inoxidável apresentar uma condutividade térmica menor que o aço 1020, o que leva a uma temperatura mais elevada, devida ao acúmulo de calor gerado por atrito e o trabalho de deformação. Na sua fase de escoamento se observa uma força de avanço maior que para o aço 1020. Este fato pode ser correlacionado com as características mecânicas mais elevadas e a espessura de 0,1 mm maior da chapa de aço inoxidável.

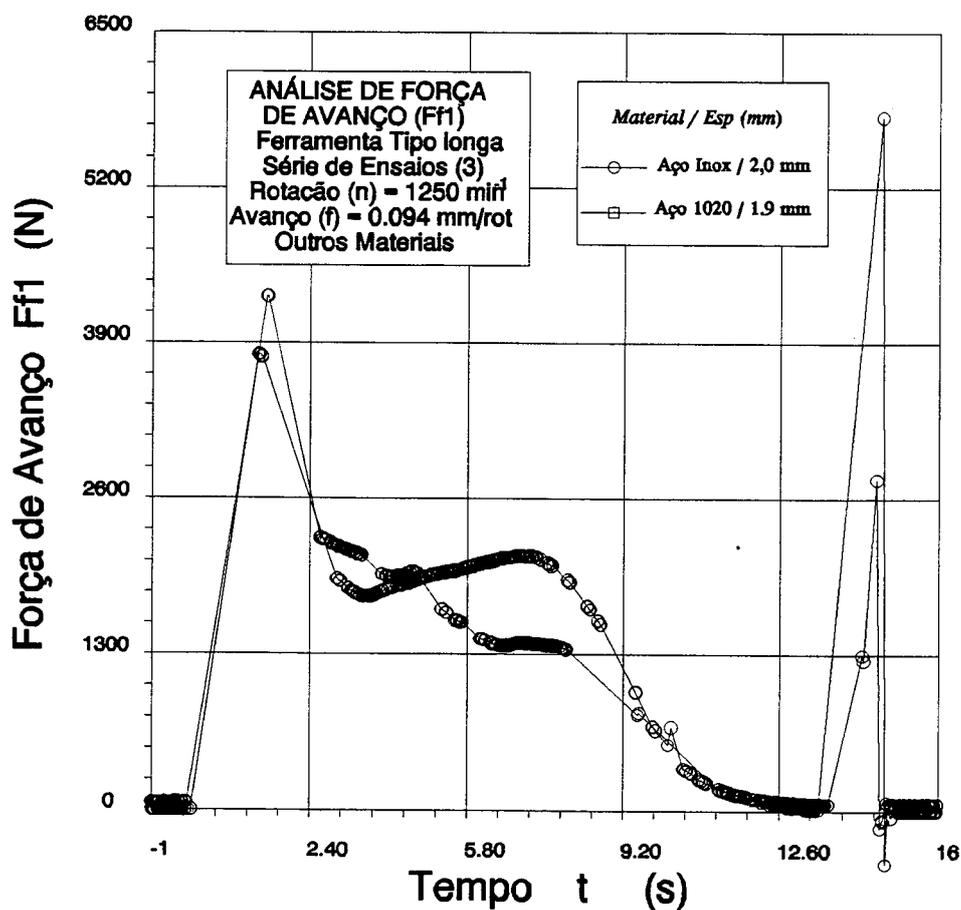
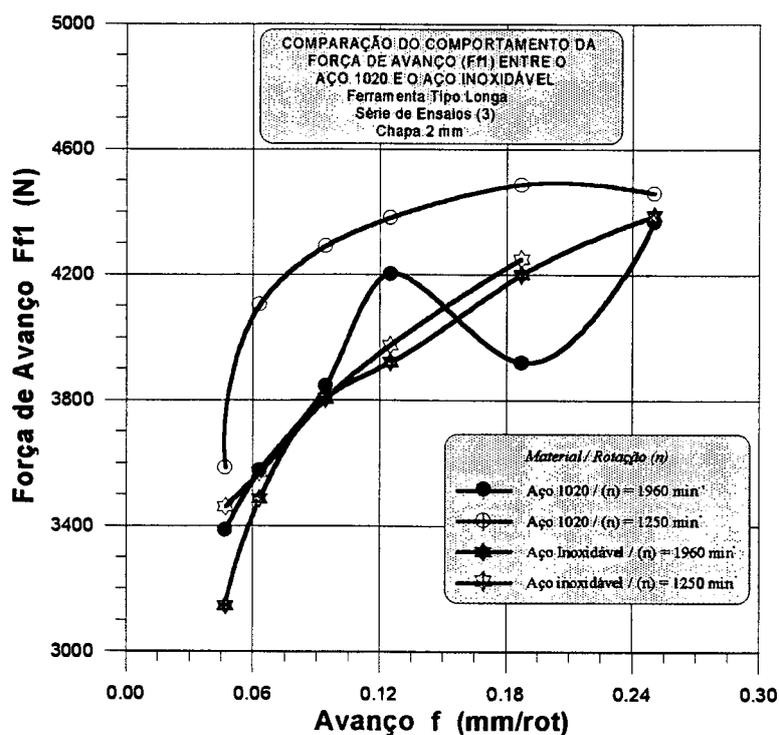


Figura 5.31 - Gráfico da Força de Avanço (Ff) - Aço inoxidável - Aço 1020

**- Comparação da Força de Avanço (Ff1) no início
da fase de escoamento para o aço inoxidável e o
aço 1020**

Com a diminuição da rotação ocorre um retardo na ocorrência de Ff1 decorrente da temperatura. Em avanços menores e rotações maiores, o calor gerado por atrito é muito maior na chapa de aço inoxidável do que na chapa aço 1020. Isto se explica devido à menor condutividade térmica que leva a temperaturas elevadas na região de contato. Já em rotações menores e avanços maiores as temperaturas envolvidas são menores e, devido à maior resistência mecânica do aço inoxidável, o mesmo necessita de forças de avanço Ff1 maiores para execução da operação.



**Figura 5.32 - Força de Avanço (Ff1) x Avanço (f)
Aço inoxidável - Aço 1020**

**- Comparação da Força de Avanço (Ff2) no final
da fase de escoamento para o aço inoxidável e
aço 1020**

Nota-se que o patamar de forças de Ff2 no aço inoxidável é maior do que no aço 1020, decorrente da maior resistência mecânica do aço inoxidável (fig. 5.33).

Analisando a posição da ocorrência de Ff2, conclui-se que devido à altura da rebarba superior diminuir com o aumento do avanço e com a redução da rotação, a posição da ocorrência de Ff2 é retardada, pois como definido Ff2 ocorre imediatamente antes do tratamento da rebarba.

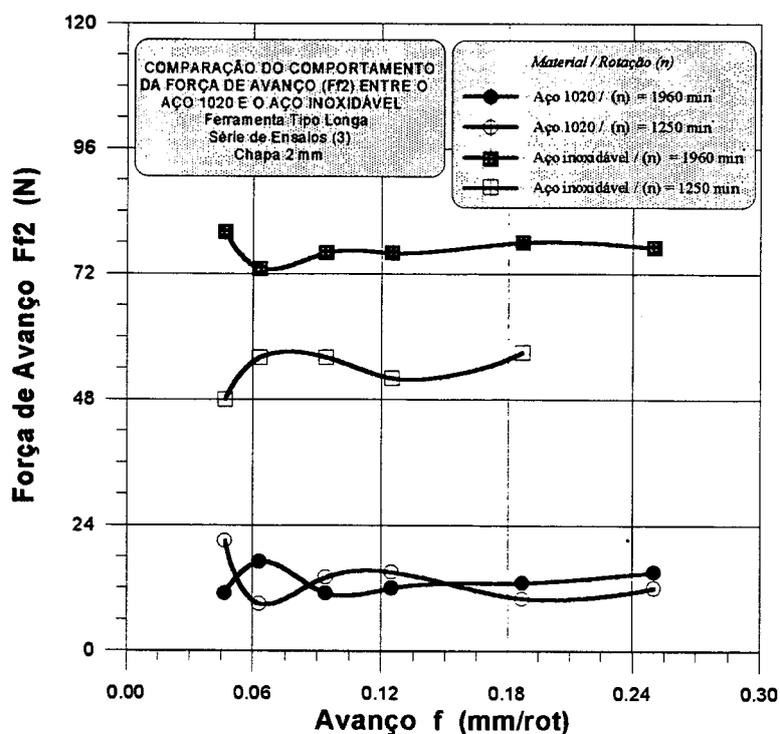


Figura 5.33 - Força de Avanço (Ff2) x avanço (f)
 Aço inoxidável - Aço 1020

- Análise do gráfico do momento torçor (M_t) durante o processo para o aço inoxidável e aço 1020

O comportamento apresentado pelo momento torçor durante a realização do furo é semelhante para os dois materiais apresentados. Como já mencionado anteriormente, o momento torçor depende essencialmente da área de contato entre ferramenta e peça e do atrito entre a ferramenta e peça, bem como das propriedades mecânicas e condutividade térmica do material.

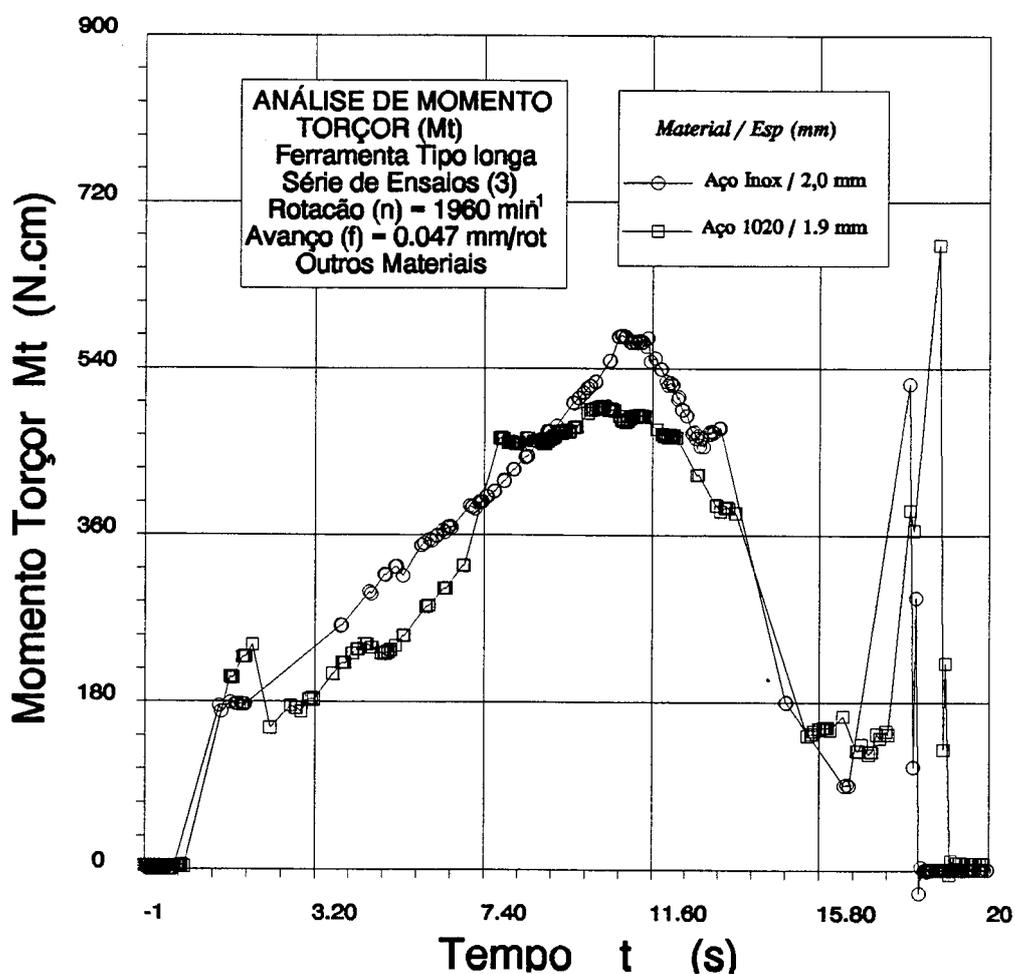
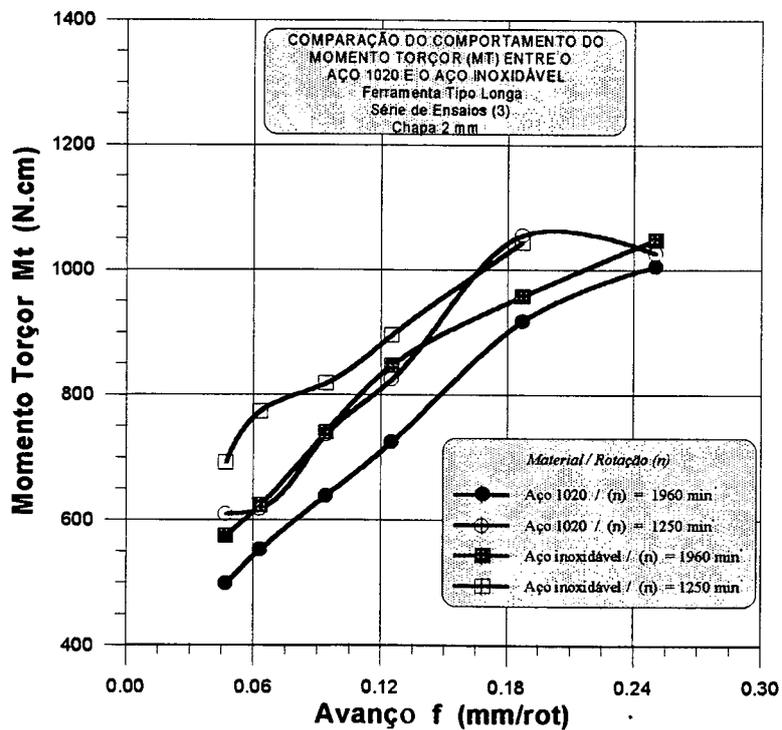


Figura 5.34 - Gráfico do Momento torçor (M_t) - Aço inoxidável - Aço 1020

- Comparação do Momento Torçor (Mt) máximo na fase de escoamento para o aço inoxidável e aço 1020

Os momentos torçores apresentados nos ensaios realizados nas chapas de aço inoxidável e aço 1020 são bastante similares, e seguem o comportamento observado em outros ensaios.



**Figura 5.35 - Momento Torçor (Mt) x avanço (f)
Aço inoxidável - Aço 1020**

**- Qualidade das rebarbas formadas pelo processo
de furação por escoamento.**

ALUMÍNIO

Percebe-se que o tipo de alumínio estudado apresenta grande dificuldade de realização da furação por escoamento. Devido ao calor gerado por atrito as rebarbas inferiores dos furos chegam quase fundir-se em rotações altas e baixos avanços.

Conseguiram-se resultados de qualidade de rebarbas apenas medianos quando se utilizaram avanços altos com rotações mais altas.

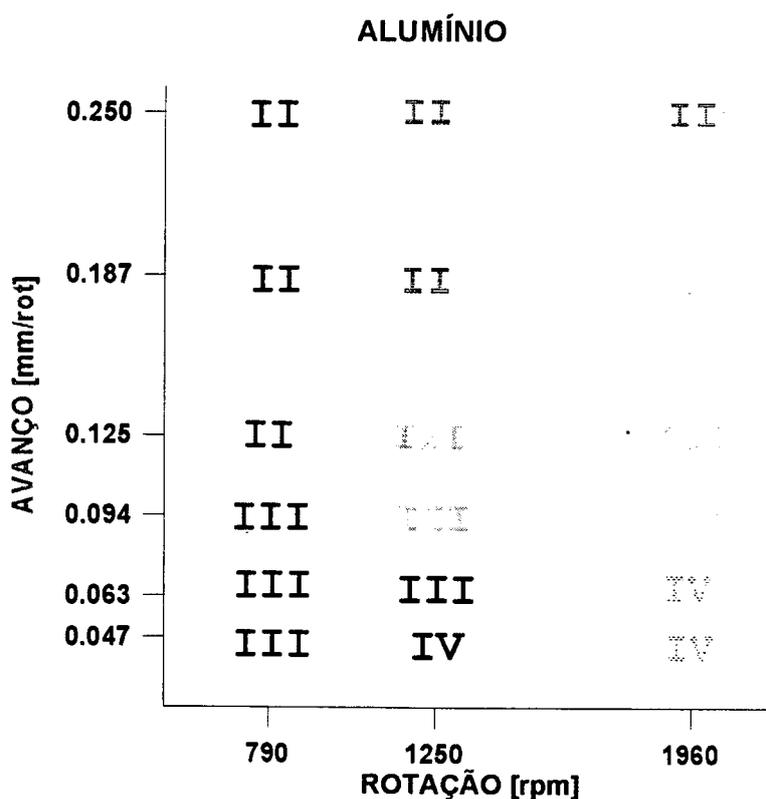


Figura 5.36 - Qualidade das Rebarbas - Alumínio

COBRE

O cobre também apresentou comportamento bem diferente do aço. Só se consegue resultados satisfatórios com rotações baixas e avanços altos.

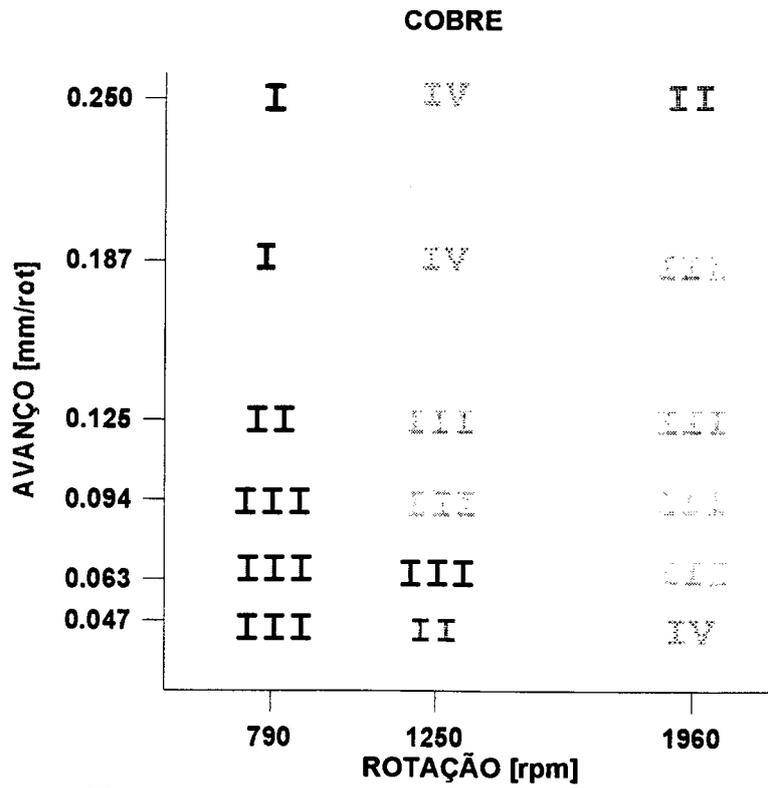


Figura 5.37 - Qualidade das rebarbas - Cobre

AÇO INOXIDÁVEL

O aço inoxidável apresentou seus melhores resultados em rotações maiores e avanços menores, justamente quando a geração de calor é maior, e neste caso de grande importância para formação de uma bucha com rebarbas de boa qualidade.

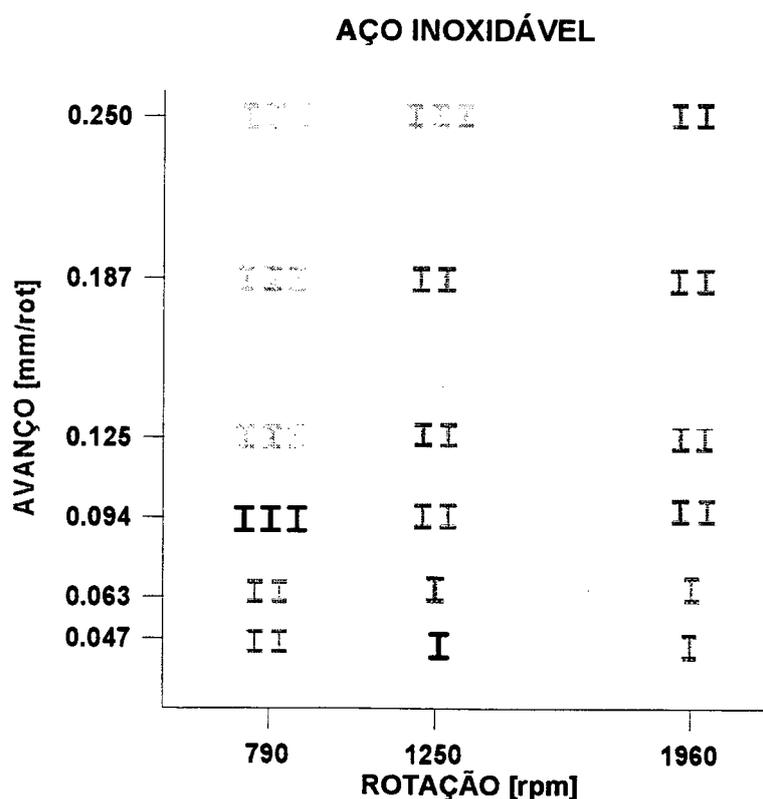


Figura 5.38 - Qualidade das rebarbas - Aço inoxidável

Outros parâmetros

Foram analisados outras combinações de parâmetros e o comportamento apresentado foi semelhante aos resultados obtidos na fase de ensaios com ferramenta longa .

5.3.3. FURAÇÃO DE CHAPAS DUPLAS UTILIZANDO O PROCESSO DE FURAÇÃO POR ESCOAMENTO

Neste experimento procuramos avaliar as possíveis diferenças entre a furação por escoamento em chapas isoladas e a furação em chapas duplas, pois uma das grandes aplicações desse processo pode envolver a união de duas chapas por um furo feito por escoamento. A ferramenta utilizada foi a do tipo longa de diâmetro 12 mm, que produz um furo cilíndrico. Foram utilizadas chapas de aço 1020 de 1,9 e 4,1 mm de espessura.

Procurou-se avaliar as alterações que poderiam ocorrer nos pontos de força de avanço e momento torçor e descobrir suas possíveis causas. Os dados foram comparados com chapas furadas separadamente. Uma das grandes dificuldades encontradas para esse experimento foi a colocação perfeita das chapas duplas no dispositivo. A desuniformidade das chapas acarretou problemas de fixação.

- *Comportamento da Força de Avanço (F_f) no início da fase de escoamento*

As forças de avanço são menores para as chapas duplas, por serem furadas quase que em momentos separados, e uma chapa de 1,9 mm exige forças bem menores do que uma chapa de 4,1 mm de espessura.

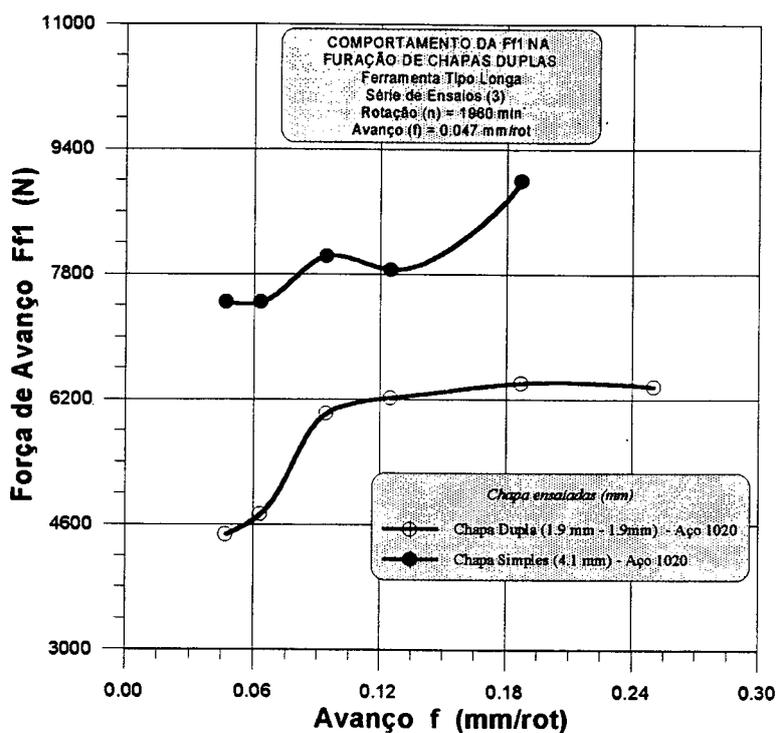


Figura 5.39 - Força de avanço (Ff1) - chapas duplas

- Comportamento do Momento Torçor (M_t) máximo durante a fase de escoamento

As chapas duplas (1,9 mm - 1,9 mm) apresentam momentos maiores por existir uma superfície de separação entre as chapas e por ocorrer o fenômeno de empurramento do material (fig. 5.41) de uma chapa contra outra, dificultando o torque (fig. 5.40).

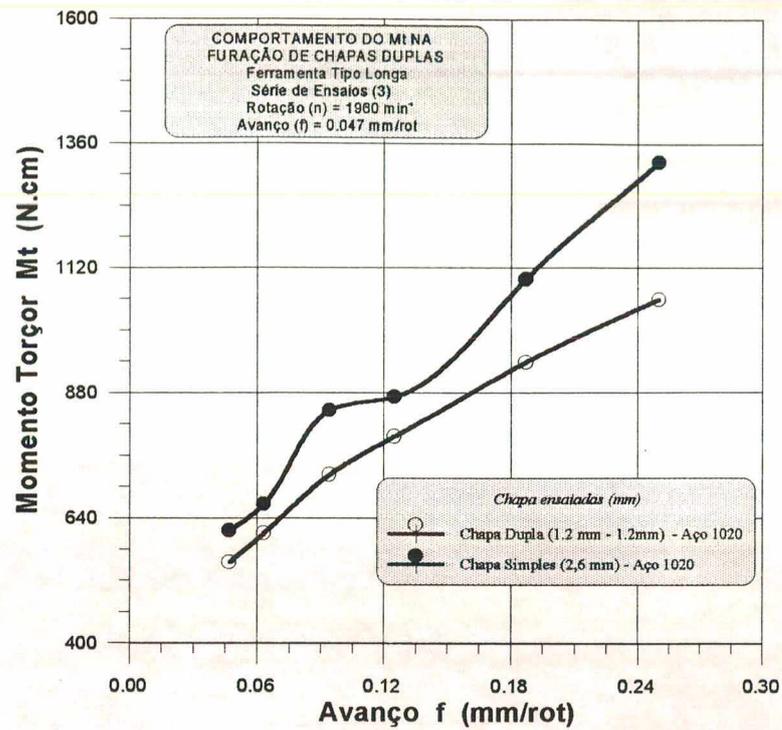


Figura 5.40 - Momento Torçor (Mt) - Chapas duplas

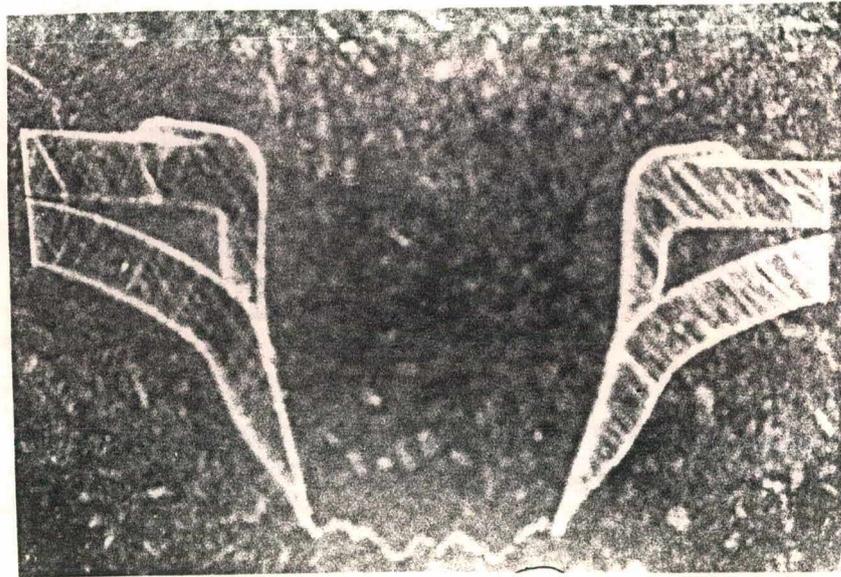


Figura 5.41 - Fenômeno do empurramento

5.3.4. FORÇA DE AVANÇO (F_f) E MOMENTO TORÇOR (M_t) DO PROCESSO DE FURAÇÃO POR ESCOAMENTO VARIANDO-SE A ESPESSURA DA CHAPA

A gráfico da figura 5.42 procura mostrar as forças envolvidas no processo de furação por escoamento. Os dados apresentados foram todos adquiridos variando-se a espessura da chapa.

A força de avanço (F_f) tem um crescimento muito mais acentuado do que o momento torçor (M_t). Em comparação com os resultados apresentados pela furação com brocas helicoidais, a força de avanço (F_f) apresentou valores aproximadamente dez vezes superiores aos valores de força de avanço média da furação com brocas helicoidais. Já para valores do momento torçor máximo da furação por escoamento foram encontrados valores de aproximadamente o dobro dos valores encontrados para momento torçor na furação com brocas helicoidais. Comparando-se os resultados de força de avanço e momento torçor, encontramos valores favoráveis à furação com brocas helicoidais.

Os ensaios foram realizados com uma ferramenta de 12 mm de diâmetro em chapas de até 8 mm, bem acima das valores recomendados pelo fabricante da ferramenta. Nos ensaios em condições severas, verifica-se um desgaste acentuado das ferramentas, devido às altas temperaturas envolvidas (fig. 5.43). A temperatura do processo se torna tão alta a ponto de incendiar o lubrificante (fig. 5.44).

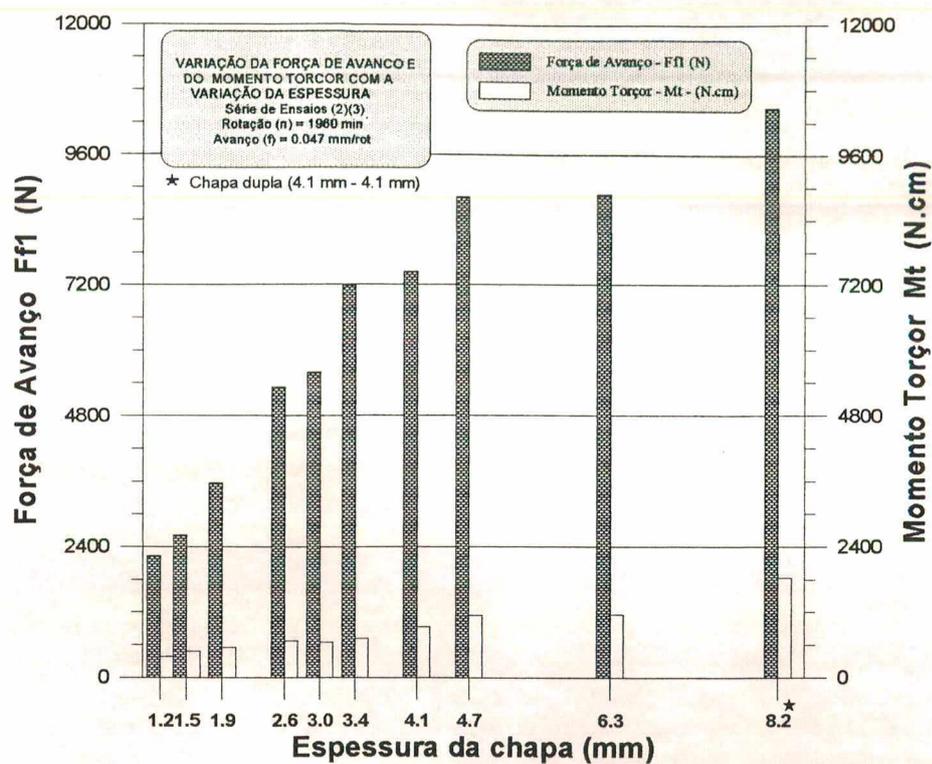


Figura 5.42 - Amplitudes de Força de Avanço (Ff1) e Momento Torçor (Mt) - Furação por escoamento

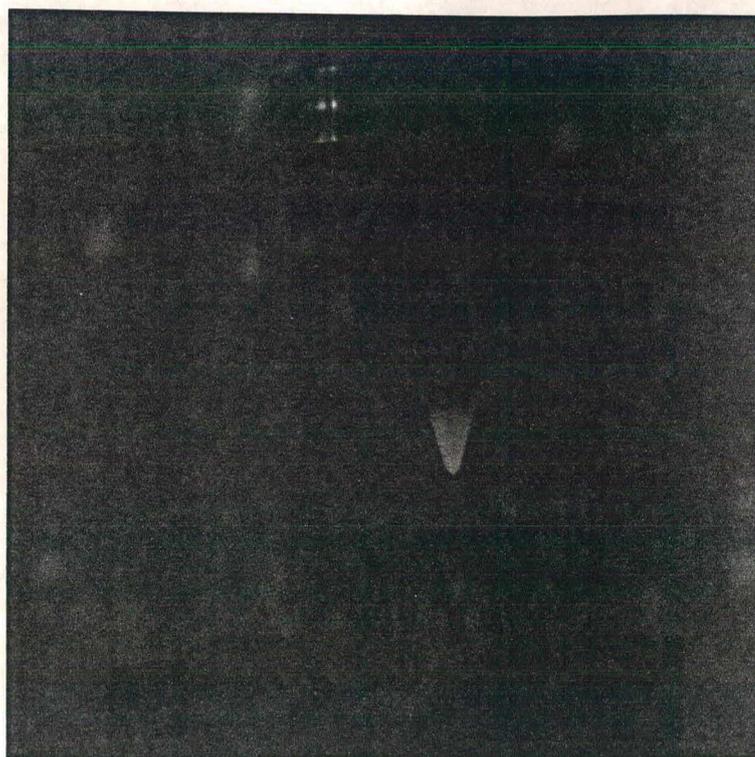


Figura 5.43 - Ferramenta após o término da furação por escoamento

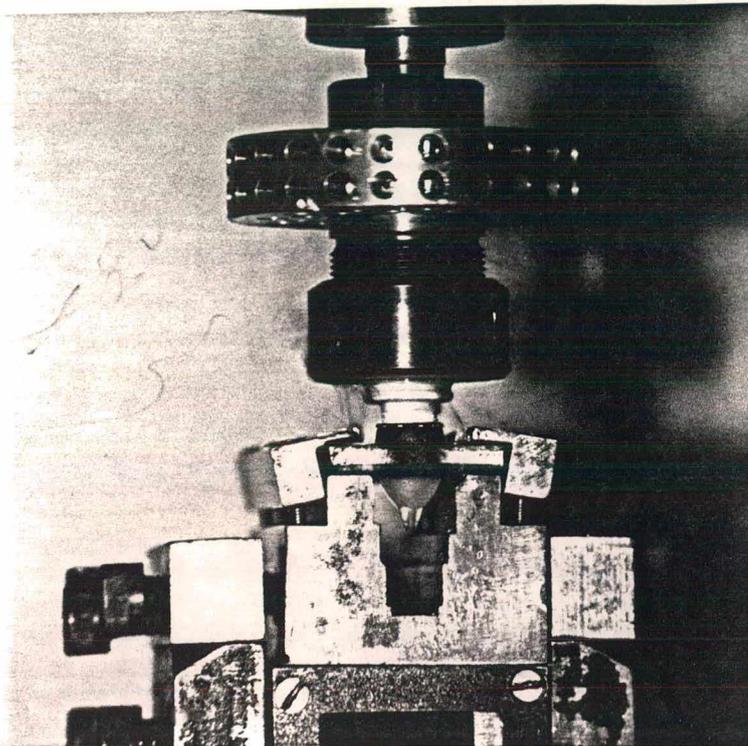


Figura 5.44 - Processo de furação por escoamento durante a realização de um ensaio em chapa de 8,2 mm

5.4. FURAÇÃO POR ESCOAMENTO UTILIZANDO FORÇA DE AVANÇO CONSTANTE

Neste experimento procurou-se avaliar o comportamento do processo de furação por escoamento quando da realização da operação com uma força de avanço constante. Também pretendeu-se avaliar a exequibilidade da furação por escoamento utilizando esse sistema

Utilizando a mesma estrutura experimental de ensaio, foram adquiridos dados de força de avanço e momento torçor do processo.

Para a aplicação da força foi utilizado um dispositivo de alavanca onde eram carregadas as massas calibradas (fig. 5.45). Para uma aplicação de 40 kg no dispositivo, a força estática medida acusou 2.100 N.

A ferramenta utilizada foi a do tipo longa com diâmetro de 12 mm. Foram utilizados para esse experimento chapas de aço 1020 de diferentes espessuras e chapas de alumínio, cobre e aço inoxidável.

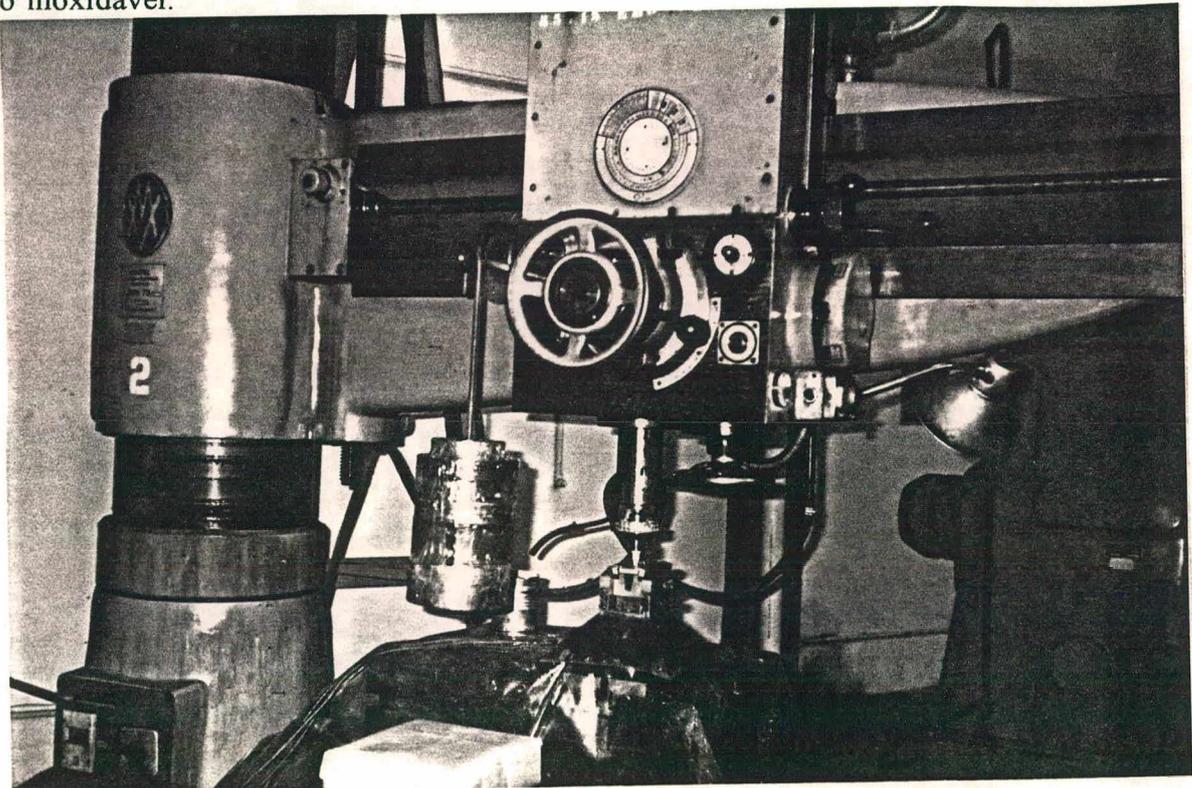


Figura 5.45 - Foto do experimento com força de avanço constante

- Comportamento da força de avanço durante a furação por escoamento com força de avanço constante

O gráfico de força de avanço para furação com força aplicada constante é bem característico. Ele apresenta um rápido aumento no início do processo representado pelo contato da ponta da ferramenta na chapa. Em seguida verificamos a ocorrência de uma longa faixa com força de avanço praticamente constante. Observa-se que a ferramenta fica atritando na chapa por um longo tempo até gerar calor suficiente para escoar o material. A partir desse momento o processo se desenrola rapidamente e o furo é totalmente executado. O pico da força de avanço no final do processo pode ser explicado pelo impacto do colar da ferramenta com a rebarba superior formada, sendo mais uma perturbação causada no equipamento de medição do que uma característica do processo.

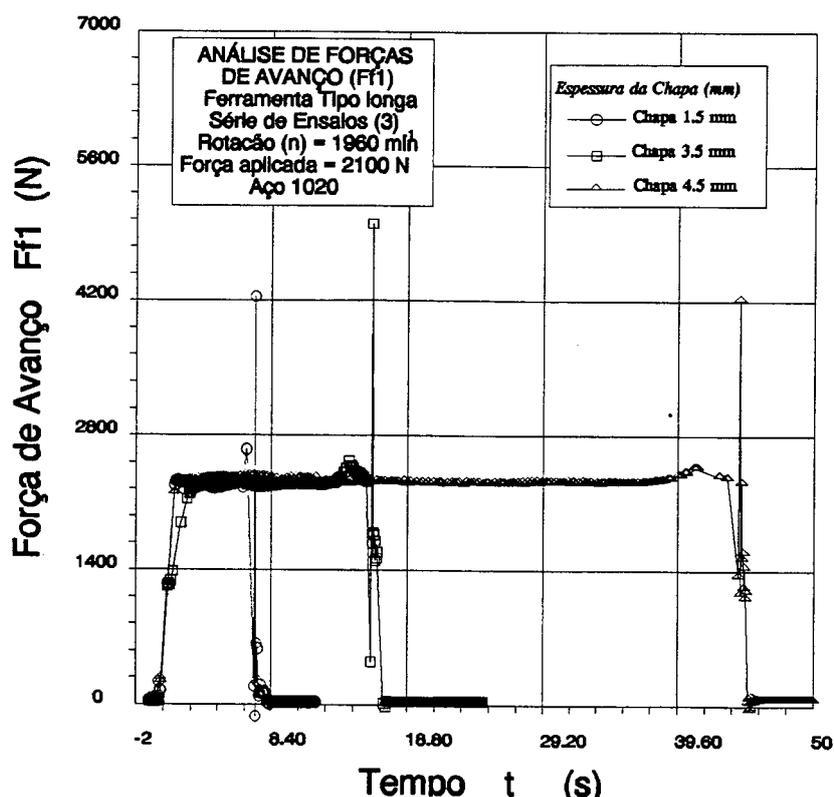


Figura 5.46 - Força de avanço (Ff) - força aplicada constante

**- Comportamento do momento torçor (M_t) durante
a furação com força de avanço constante**

O gráfico de momento torçor (fig. 5.47) também é bem peculiar na furação por escoamento com força de avanço constante. No início do processo, quando a ponta da ferramenta fica atritando contra a chapa, a área de contato entre a ferramenta e a peça é muito pequena e o momento é baixo. Com o desenvolvimento do processo a ferramenta penetra na chapa e vai aumentando o momento torçor. No instante em que a ferramenta consegue gerar calor por atrito suficiente para escoar o material da chapa, o processo se desenrola rapidamente e o momento torçor aumenta em decorrência da maior área de contato da ferramenta com a peça.

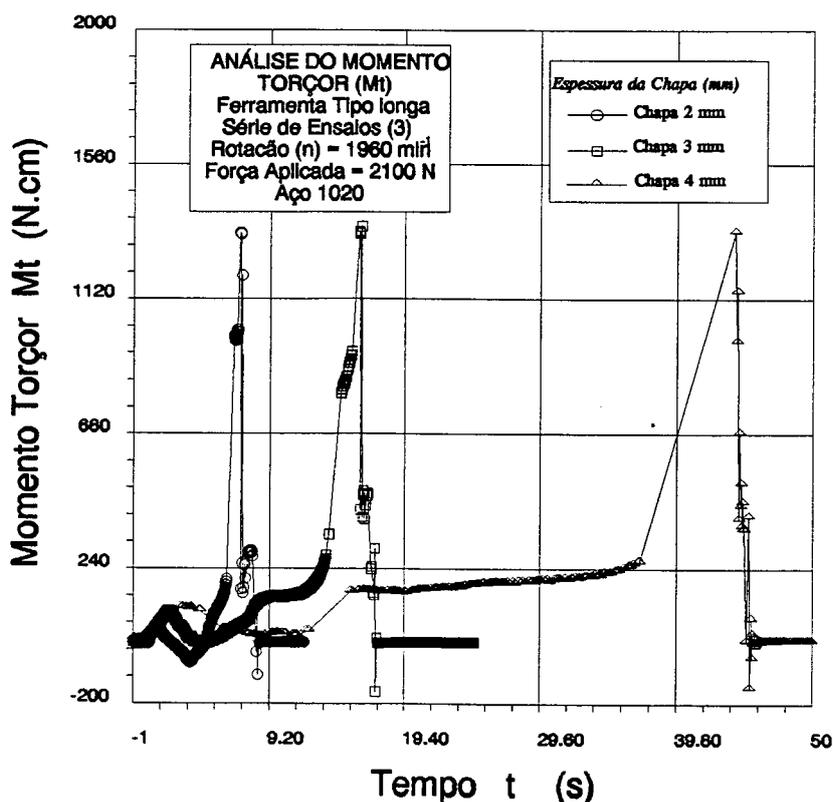


Figura 5.47 - Momento Torçor (M_t) - força aplicada constante

- Análise da força de avanço média (F_{fmed}) e momento torçor máximo ($M_{tmáx}$) na furação por escoamento com força de avanço constante

Analisando os dados conclui-se que o processo de furação por escoamento com força de avanço constante depende em grande parte da carga aplicada.

Os valores de força de avanço média (F_{fmed}) e momento torçor máximo ($M_{tmáx}$) do processo independem da espessura da chapa.

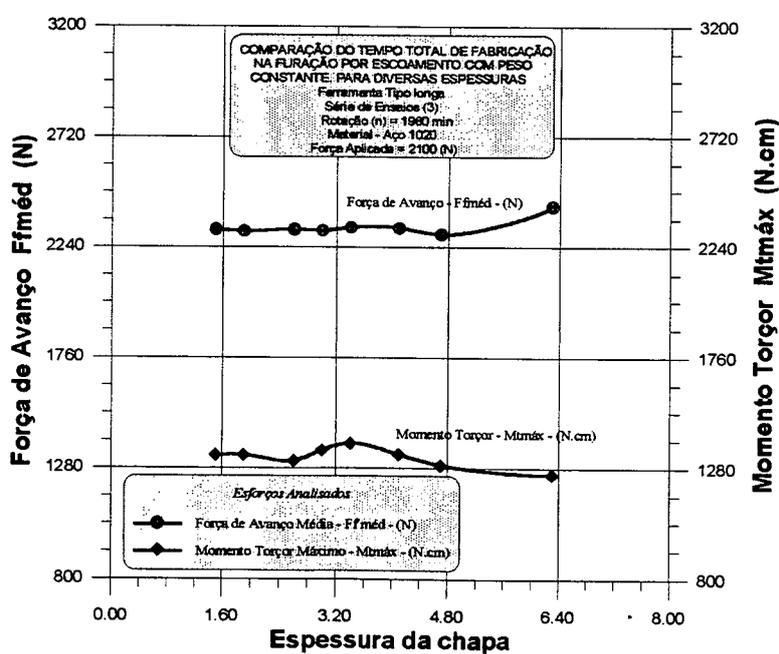
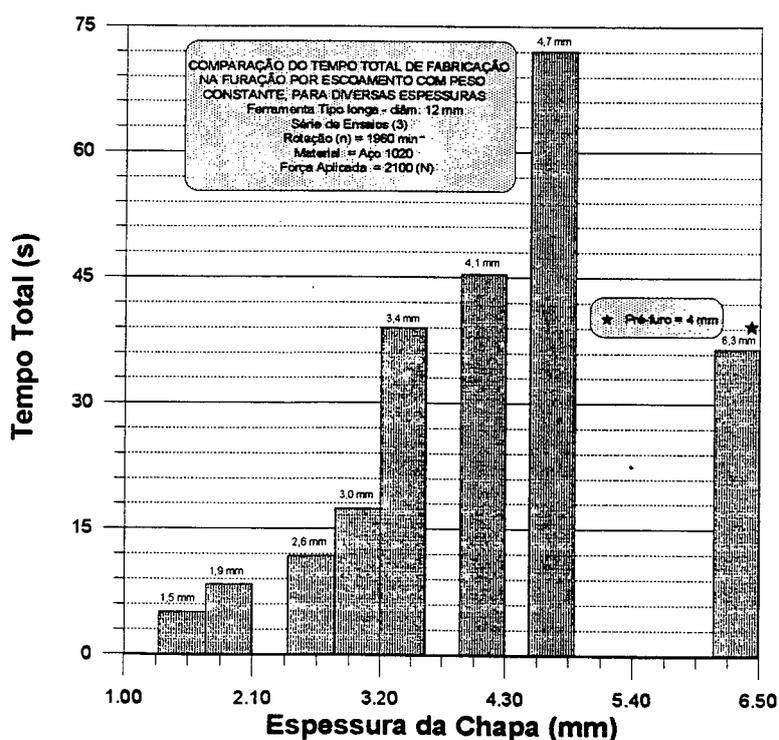


Figura 5.48 - Força de avanço média (F_{fmed}) e Momento Torçor máximo ($M_{tmáx}$) Força de avanço constante

- Influência da espessura da chapa no tempo total do processo para furos com força aplicada constante

Com o aumento da espessura da chapa ocorre um aumento significativo do tempo de processo. Este fato é explicado pela dissipação e geração de calor no início do processo, mais favorável em chapa espessas, de forma que nestas, o tempo requerido para atingir a temperatura de escoamento é maior. Isso torna esse tipo de procedimento muito improdutivo, pois se necessita de um grande tempo para realização dos furos, chegando a ser seis vezes maior que na furação com avanço constante.



**Figura 5.49 - Tempo total (t) x espessura da chapa (e)
Força aplicada constante**

**- Influência da rotação no tempo total de processo
para furos com força aplicada constante.**

A diminuição da rotação leva a aumento substancial do tempo de fabricação, chegando até à não realização do furo. Isto significa que apesar da força aplicada, em rotações menores não existe geração de atrito suficiente para desenvolver o processo. Aqui também os tempos totais de processo são muito longos, dificultando o seu uso produtivo.

Verifica-se que abaixo de uma rotação mínima o processo de furação não se realiza, pois não se atinge a temperatura necessária para o escoamento do material (fig. 5.50).

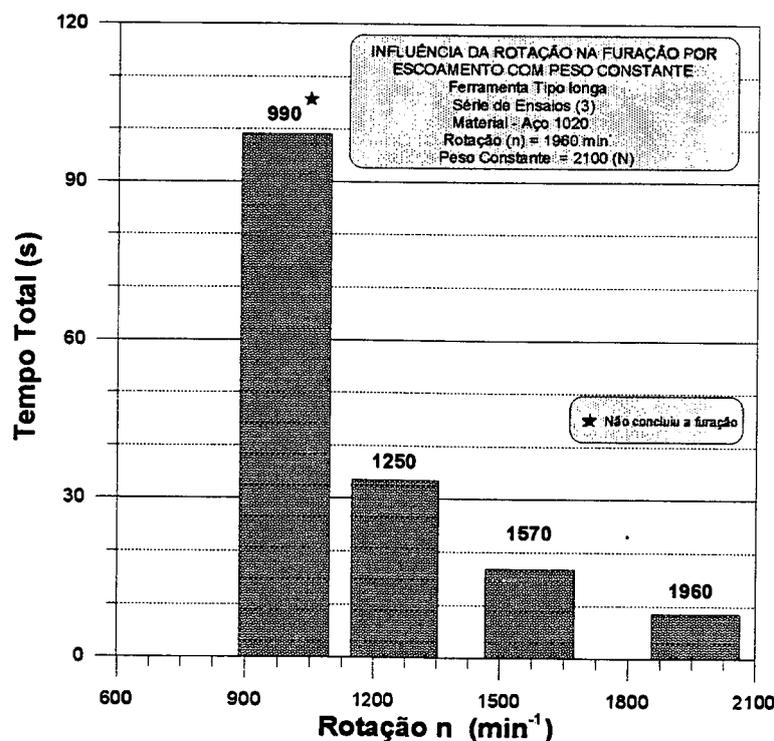


Figura 5.50 - Tempo total (t) x rotação - Furação com força de avanço constante

- Influência da força de avanço média (F_{fmed}) e do momento torçor máximo ($M_{tmáx}$) na furação por escoamento com força de avanço constante em outros materiais

Com relação à força de avanço e momento torçor o cobre, alumínio e o aço inoxidável tem comportamentos bem similares, pois neste caso o que mais influencia o experimento é a força aplicada.

O alumínio é muito mole e a força aplicada pelo dispositivo era tão grande fazendo com que o corpo de prova fosse furado quase que instantaneamente, de forma que os valores de força medidos fossem menores que da força estática aplicada (fig. 5.51). Na furação do alumínio não foi observada a formação típica de um patamar de força durante a fase de atrito.

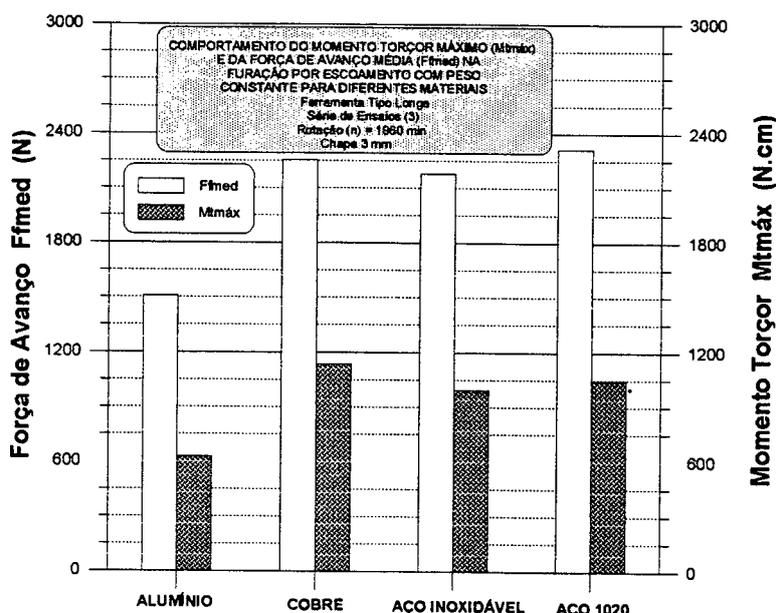


Figura 5.51 - Força de avanço média (F_{fmed}) e Momento Torçor máximo ($M_{tmáx}$) Furação com força de avanço constante

- Influência do tipo de material no tempo total de processo na furação por escoamento utilizando força de avanço constante

A condutividade térmica tem uma influência significativa sobre o tempo de furação, quando se aplica uma força de avanço constante. Sobretudo o cobre apresenta um tempo total muito maior em relação aos demais materiais. O alumínio empregado, que embora tenha uma condutividade térmica maior que dos aços, apresenta um tempo de furação menor, fato explicado pela menor resistência mecânica deste material (fig. 5.52).

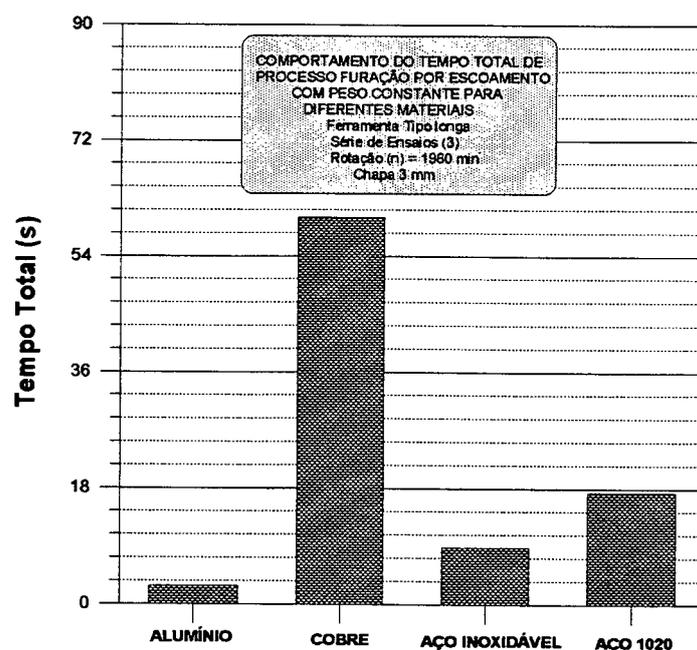


Figura 5.52 - Tempo total (t) x tipo de material - Furação com força de avanço constante

5.5. FURAÇÃO POR ESCOAMENTO COM AVANÇO MANUAL

A furação por escoamento é um processo que pode vir a ser introduzido na indústria de móveis de aço. Como neste ramo de indústria muitas vezes se requer a furação de uma estrutura montada com furadeiras manuais, deve-se conhecer os limites da furação por escoamento com avanço manual.

Foram realizados ensaios com ferramenta de furação por escoamento em chapas de aço 1020 de 3 mm de espessura com avanço manual. O gráfico da figura 5.53 mostra o comportamento da força de avanço e momento torçor durante o processo. Nota-se uma tendência de comportamento bem parecida com o processo utilizando avanços constantes.

O momento torçor aumenta com o crescimento da área de contato entre a peça e a ferramenta. A força de avanço cresce substancialmente no início e se mantém em um patamar.

O desenvolvimento do processo é determinado basicamente pela força do operador, logo este é um fator determinante para a duração do processo, bem como da qualidade dos furos.

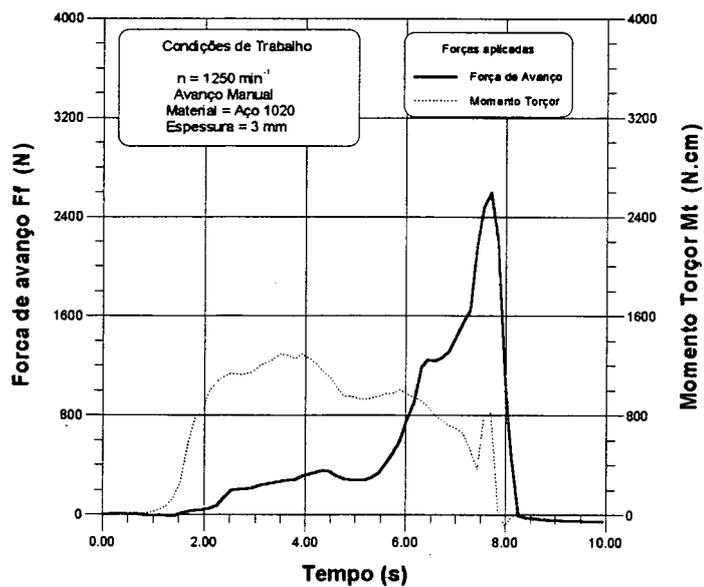


Figura 5.53 - Força de avanço e Momento torçor para furacão por escoamento com avanço manuais

5.6. DIMENSÕES DA BUCHA ESCOADA

Na verificação das características da bucha formada na furação por escoamento foram analisadas a circularidade, cilindridade, diâmetro médio, altura e diâmetro externo inferior da bucha. Foram utilizados os furos realizados em chapa de aço 1020 com ferramenta longa de 12 mm de diâmetro, em que o furo gerado era cilíndrico. As chapas de aço 1020 utilizadas foram de várias espessuras.

Para a medição das diversas características foram utilizados os seguintes equipamentos devidamente referenciados no apêndice A:

- Máquina de medir por coordenadas Zeiss (circularidade, cilindridade, diâmetro médio);
- Rugosímetro Perthen (Rugosidade Ra e Rt);
- Micrômetros e paquímetros (altura da bucha, diâmetro externo inferior da bucha formada).

- Diâmetro médio

O diâmetro médio do furo escoado depende basicamente das dimensões da ferramenta e não tem um comportamento padrão. Nota-se que os resultados encontrados se encontram na estreita faixa de 0,06 mm, o que denota uma alta repetibilidade e precisão do processo.

Os furos produzidos pela ferramenta de furação por escoamento se classificam em uma classe de tolerância entre IT 9 e IT 10. As brocas convencionais normalmente permitem obter dimensões na faixa de IT 11 e IT 12 [42].

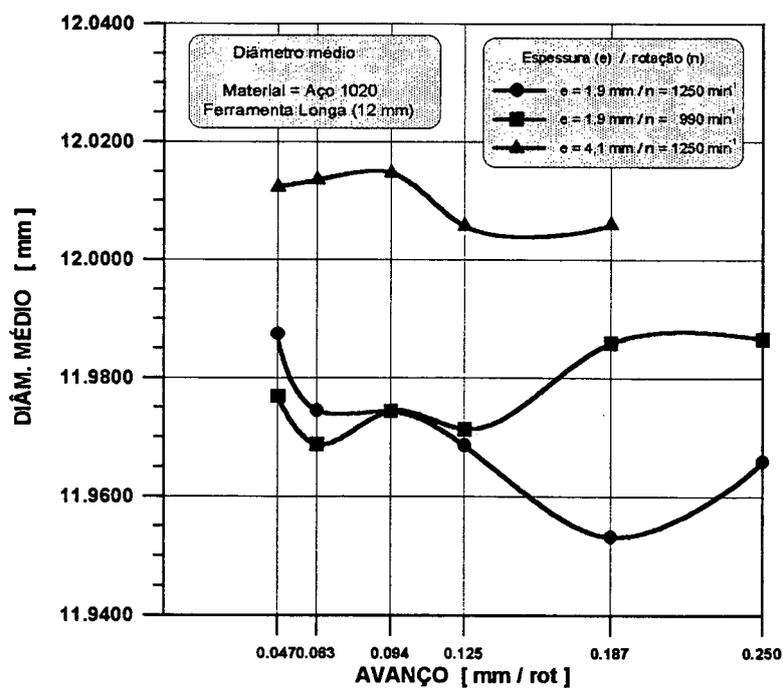


Figura 5.54 - Diâmetro médio em função do avanço para diversas espessuras e rotações

- Circularidade

O erro de circularidade dos furos não apresentou uma tendência clara, mas notou-se que os valores se apresentaram basicamente entre 20 e 70 μm (fig. 5.55). Os furos produzidos com brocas convencionais apresentam valores de até 200 μm e furos alargados com ferramentas convencionais atingem normalmente de 20 a 40 μm [39].

A fig. 5.56 mostra uma medição da circularidade dos furos produzidos por escoamento e nota-se uma tendência a se formar um furo com as características da forma da ferramenta, mas com resultados bem satisfatórios.

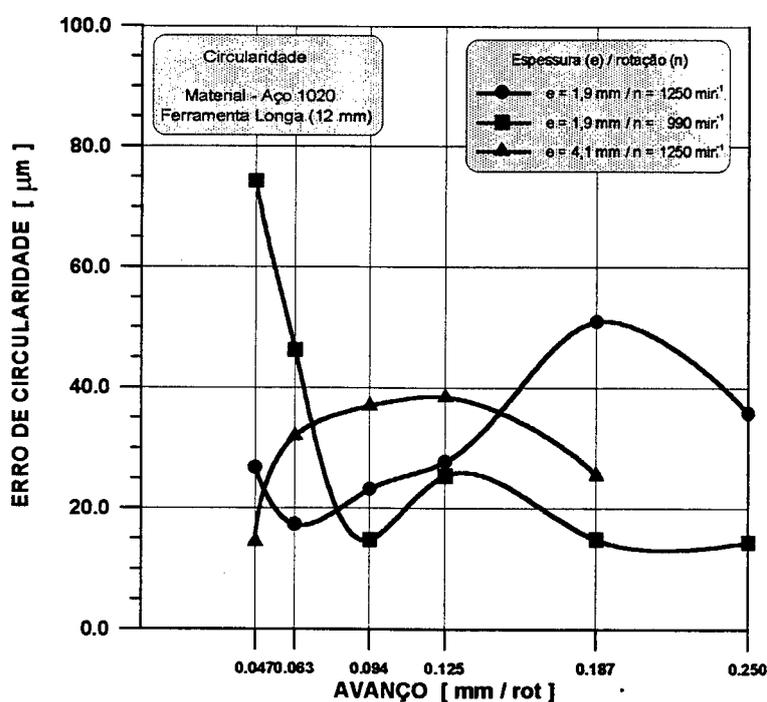


Figura 5.55 - Erro de circularidade em função do avanço para diversas espessuras e rotações

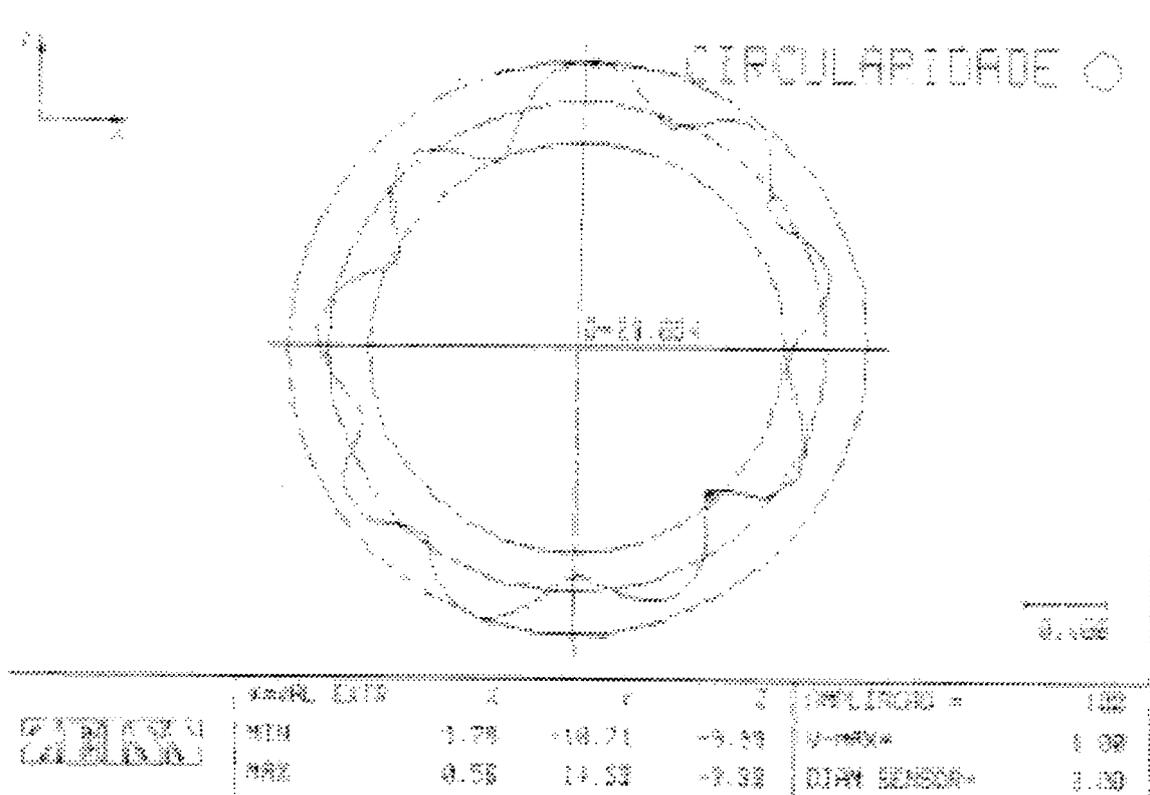


Figura 5.56 - Esquema da medição do erro de circularidade em um furo escoado

- *Cilindricidade*

Os resultados do erro da cilindridade dos furos escoados não têm uma tendência particular. Os valores estão situados entre 20 a 80 μm .

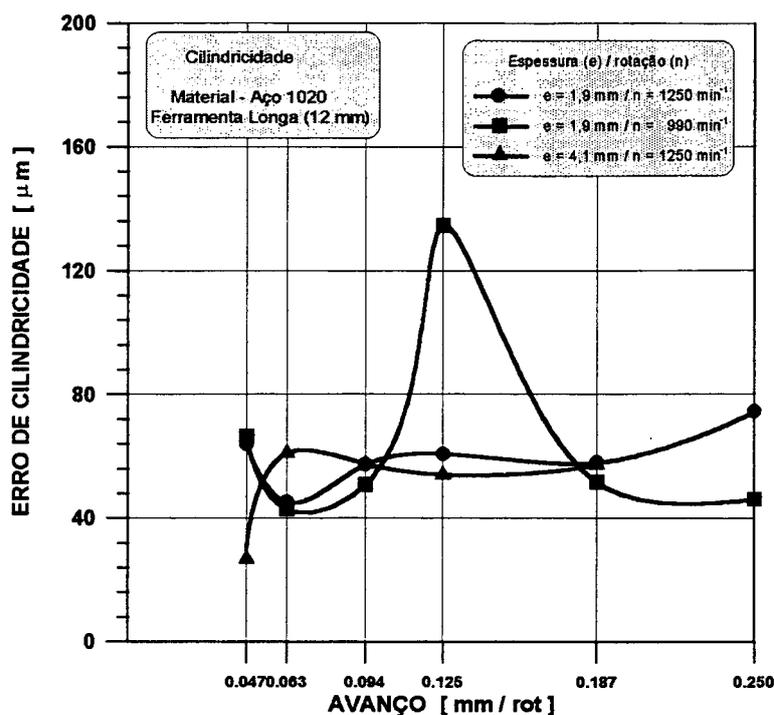


Figura 5.57 - Erro de cilindridade em função do avanço para diversas espessuras e rotações

- Rugosidade

Os gráficos de rugosidade, tanto Ra como Rt, apresentaram um comportamento crescente dos valores de rugosidade com o aumento do avanço. A amplitude dos valores de Ra ficou entre 0,20 e 1,7 μm (fig. 5.58). Os valores encontrados estão bem abaixo dos valores para a furação com brocas convencionais que ficam entre 1,6 e 2,5 μm [56].

A rugosidade Rt apresentada também ficou bem abaixo da rugosidade para furação com brocas helicoidais (fig. 5.59). Para a furação por escoamento, os valores encontrados ficaram entre 2 e 18 μm, enquanto que para furação com brocas se admitem valores de 0,2 e 40 μm.

O processo de furação por escoamento pode ser classificado, segundo os critérios de rugosidade, entre as qualidade N4 a N7, sendo que na furação com brocas helicoidais a classe de qualidade está entre N7 a N11 [56].

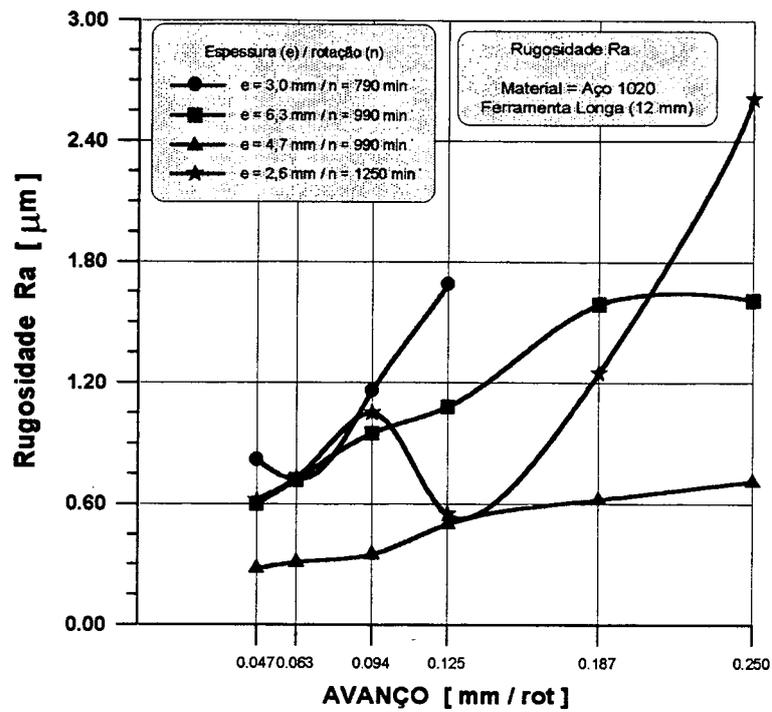


Figura 5.58 - Rugosidade Ra em função do avanço para diversas espessuras e rotações

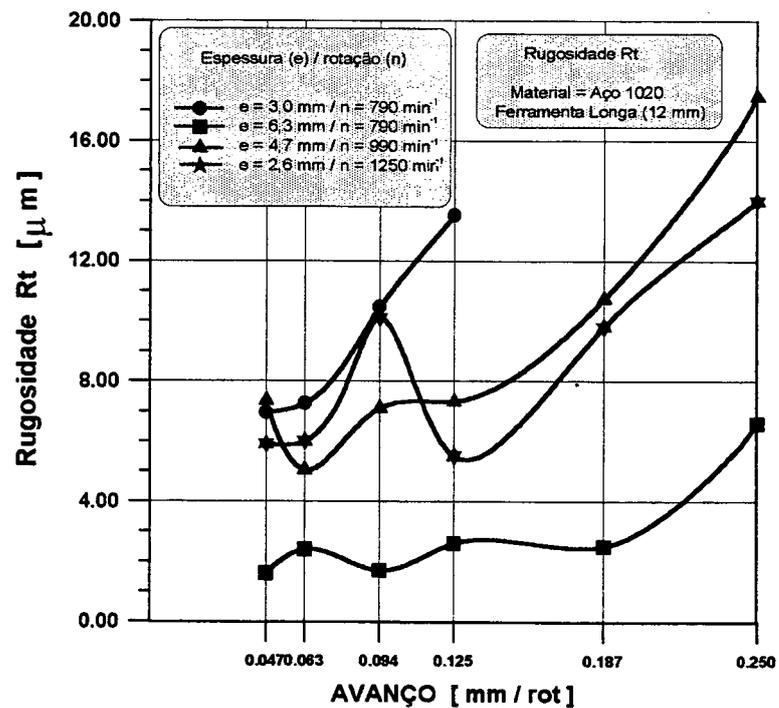


Figura 5.59 - Rugosidade Rt em função do avanço para diversas espessuras e rotações

- Diâmetro externo inferior e altura da bucha

Também foram realizadas medições da altura da bucha sem a rebarba superior e do diâmetro externo inferior das buchas fabricadas por escoamento (fig. 5.60).

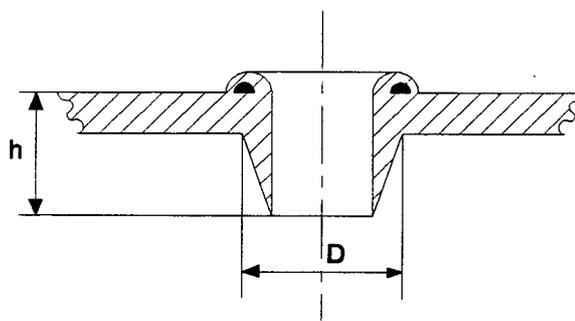


Figura 5.60 - Altura e diâmetro externo inferior da bucha escoada

Os resultados das medições mostraram o aumento do diâmetro externo inferior com o aumento do avanço (fig. 5.61) e uma diminuição da altura da bucha com o aumento do avanço (fig. 5.62). Com o aumento do avanço ocorre uma diminuição do calor gerado por atrito na região de trabalho. Sabendo-se que o material a ser deslocado da região do furo para formação da rebarba superior e inferior é o mesmo não importando o avanço, verifica-se que em avanços menores existe mais calor na região de trabalho, facilitando o escoamento do material, ocasionando maiores valores de altura da bucha e menores valores do diâmetro externo inferior. Em avanços maiores ocorre justamente o contrário. Este comportamento é visível em todos os ensaios realizados.

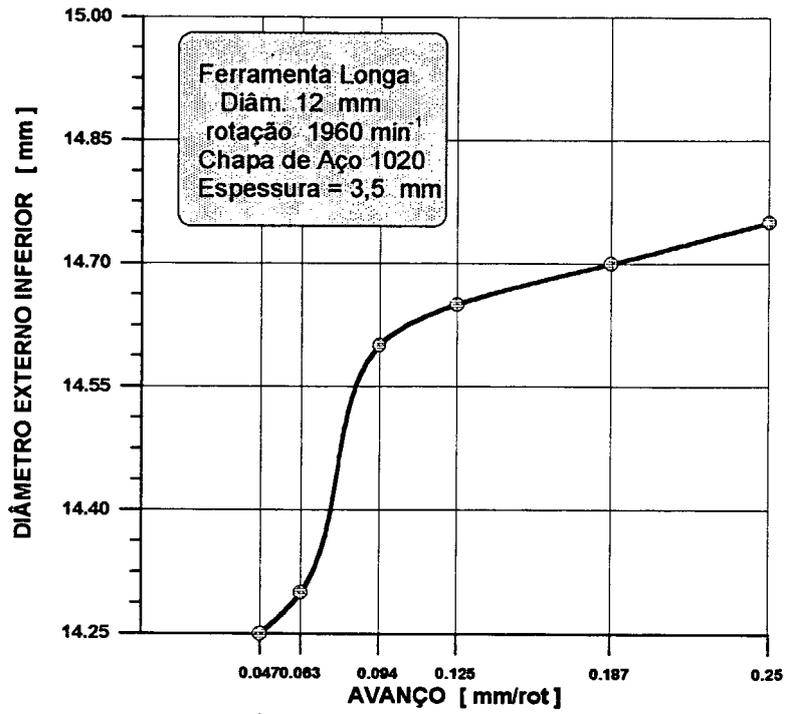


Figura 5.61 - Diâmetro externo inferior (d) x avanço (f)

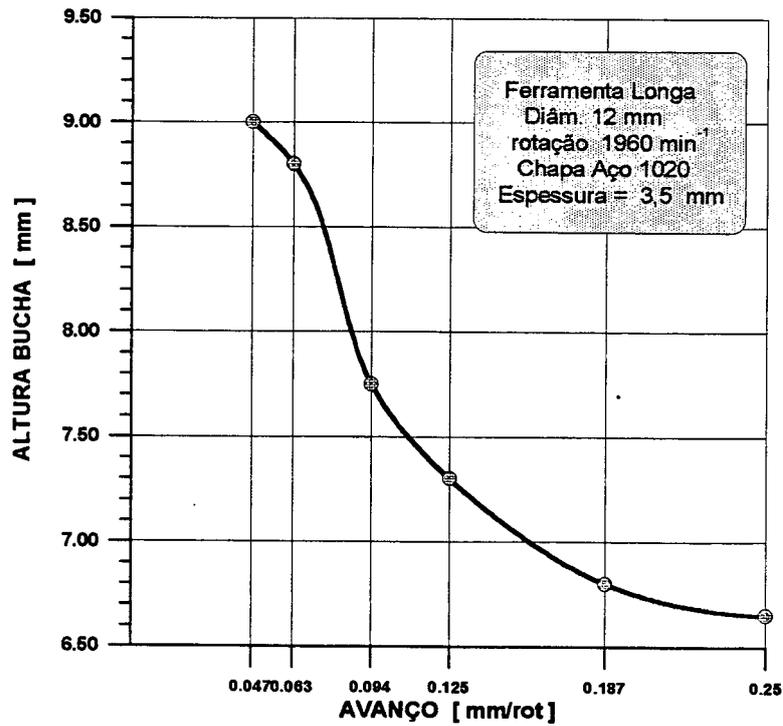


Figura 5.62 - Altura da bucha (h) x avanço (f)

5.7. ANÁLISE DA TEMPERATURA DA PEÇA DURANTE A FURAÇÃO POR ESCOAMENTO E DE OUTROS PARÂMETROS DE ENTRADA E CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO

5.7.1. MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DURANTE A FURAÇÃO POR ESCOAMENTO

Para a análise da temperatura no processo de furação por escoamento foram utilizadas chapas de 38 mm x 38 mm x 3 mm. Os corpos de prova foram fixados no dispositivo e montados na furadeira radial. Utilizou-se o termopar de Chromel-Alumel do tipo K com diâmetro de 0,7 mm acoplado a um multímetro Fluke modelo 8024 B, tendo sido soldado na superfície inferior da chapa. A ferramenta de furação por escoamento utilizada foi do tipo curta com 11,7 mm de diâmetro. O esquema abaixo demonstra a montagem do experimento (fig. 5.63).

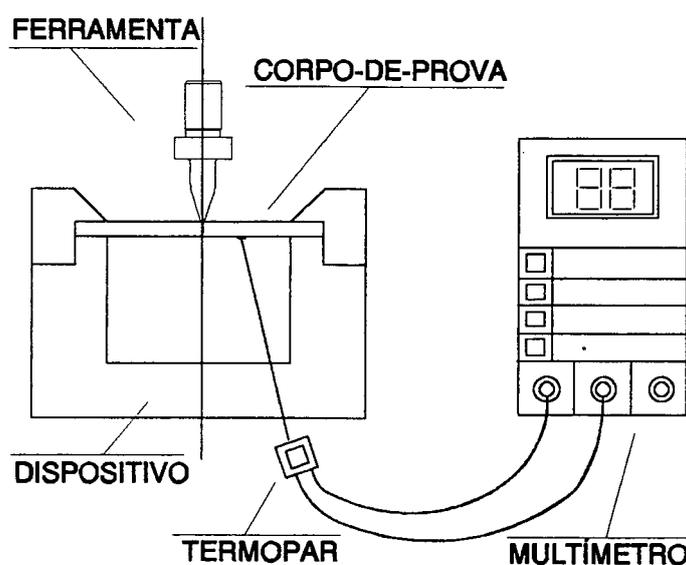


Figura 5.63 - Esquema de montagem do experimento para medição de temperatura durante o processo de furação por escoamento

Os ensaios para determinação da temperatura durante o processo de furação por escoamento foram realizados sob as melhores condições de trabalho que o processo apresentou durante todo o estudo. Foi utilizada a rotação de 1900 min^{-1} e avanço de $0,094 \text{ mm/rot}$.

Foram realizados os ensaios, durante os quais se observou a maior tensão que o multímetro apresentou durante todo o processo [60].

Para a conversão da tensão em temperatura, levando-se em conta o termopar utilizado, a norma DIN 43710 apresenta a relação entre as mesmas (T_{term}).

O valor da temperatura também pode ser obtido por uma equação. Esta equação converte a tensão em temperatura com boa aproximação (T_{eq}). Esta equação foi retirada do catálogo do fabricante do termopar e garante os valores adquiridos nos ensaios.

$$T_{\text{eq}} (V) = 0,226584602 + 24152,109 \cdot V + 67233,4248 \cdot V^2 + 2210340,682 \cdot V^3 - 860963914,9 \cdot V^4 + 4,83506 \cdot 10^{10} \cdot V^5 - 1,18452 \cdot 10^{12} \cdot V^6 + 1,38690 \cdot 10^{13} \cdot V^7 - 6,33708 \cdot 10^{13} \cdot V^8$$

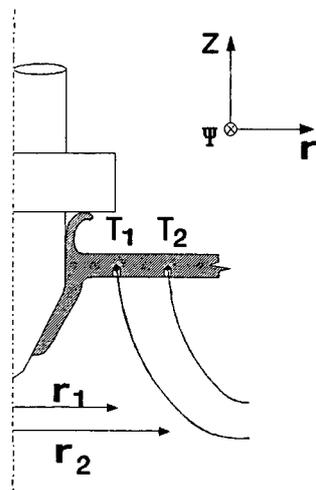
A tabela abaixo mostra os valores obtidos durante os ensaios em que r é o raio onde foi soldado o termopar, T_{term} é a temperatura conforme a norma DIN 43710 e T_{eq} é a temperatura conforme uma equação de conversão da voltagem em temperatura.

r (mm)	T_{term} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{eq} ($^{\circ}\text{C}$)
8,30	501,3	500,8
9,90	394,2	395,5
10,75	350,6	349,9

Tabela 5.6. Temperatura durante a furação por escoamento

Analisando os dados obtidos observamos que a temperatura diminui com o aumento do raio, devido a dissipação de calor na chapa [60].

Utilizando a equação abaixo podemos determinar os valores da temperatura do processo de furação por escoamento em diferentes pontos do corpo de prova (conforme fig. 2.23).



$$T(r) = \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) + T_2$$

Para o processo de furação por escoamento é importante conhecer a temperatura na região de contato entre a peça e a ferramenta, que é justamente o ponto onde existe a maior temperatura na peça.

Utilizando os dados obtidos nos ensaios na equação acima, chegamos a uma temperatura na face de trabalho em torno de 768°C.

5.7.2. ANÁLISE METALOGRAFICA DAS BUCHAS FORMADAS POR ESCOAMENTO E TAMBÉM POSTERIORMENTE ROSCADOS

Foram realizadas análises em furos escoados e posteriormente roscados por conformação. A figura 5.64 mostra a estrutura do material do furo escoado.

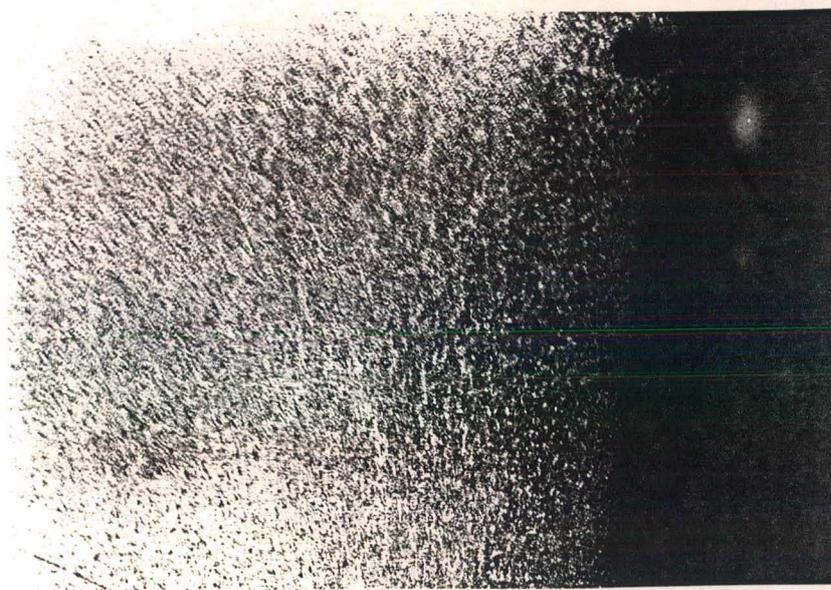


Figura 5.64 - Estrutura metalográfica do furo escoado

Percebe-se a diminuição do tamanho de grão quando se aproxima da parede do furo, melhorando as propriedades mecânicas do material da bucha escoada.

No corpo de prova roscado (fig. 5.65) percebe-se a formação da garra que pelo fato de não haver corte na superfície da rosca conformada mantém as fibras do material.

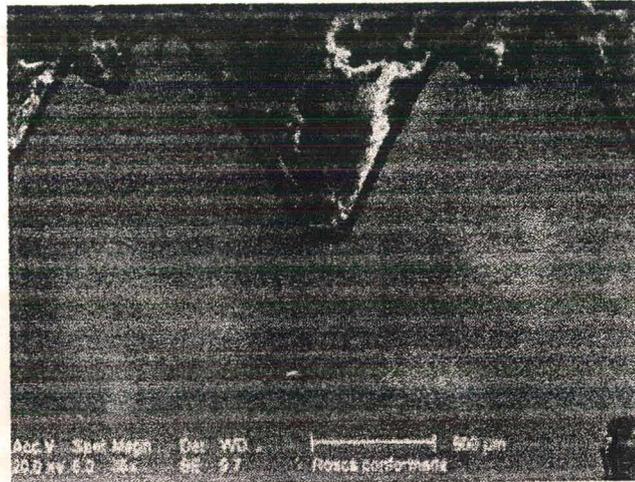


Figura 5.65 - Garra no filete conformado

5.7.3. ANÁLISE METALOGRÁFICA DA FERRAMENTA DE FURAÇÃO POR ESCOAMENTO

Com a ajuda de um microscópio foi analisada a estrutura e constituição aproximada do metal duro da qual é fabricada a ferramenta de furação por escoamento.

A fig. 5.66 mostra uma foto da estrutura do metal duro.



Figura 5.66 - Metalografia do metal duro da ferramenta de furação por escoamento

A ferramenta apresenta aproximadamente os seguintes componentes :

- 78% carboneto de tungstênio - responsável por uma maior resistência ao desgaste, por outro lado tem limitações em altas velocidades de corte devido, a sua alta difusão em temperaturas mais altas.
- 12% cobalto - com função de ligante.
- 10% carboneto de titânio - caracteriza-se por uma alta resistência a quente e pequeno desgaste abrasivo.

A dureza encontrada no metal duro foi de $H_v = 1420$. Este número é um pouco superior a $H_v = 1200$ encontrado nos metais duros tradicionais. Isto demonstra a sua grande resistência, mas também a sua fragilidade. O metal duro da ferramenta foi classificado como sendo P30, embora algumas publicações se refiram ao metal duro do tipo K para a ferramenta de furação por escoamento[2].

5.7.4. ANÁLISE DO DESGASTE DA FERRAMENTA E DAS INCRUSTAÇÕES CAUSADAS PELO PRO- CESSO

Apesar do número total de furos realizados com uma só ferramenta (800 furos) ser muito inferior aos resultados de vida (10.000 furos) encontrados na literatura, foi possível verificar um pequeno desgaste na ferramenta.

Os desgastes ocorrem principalmente na ponta e na passagem da região cônica poligonal para a região cilíndrica poligonal, sendo que na região cilíndrica o desgaste verificado foi muito pequeno.

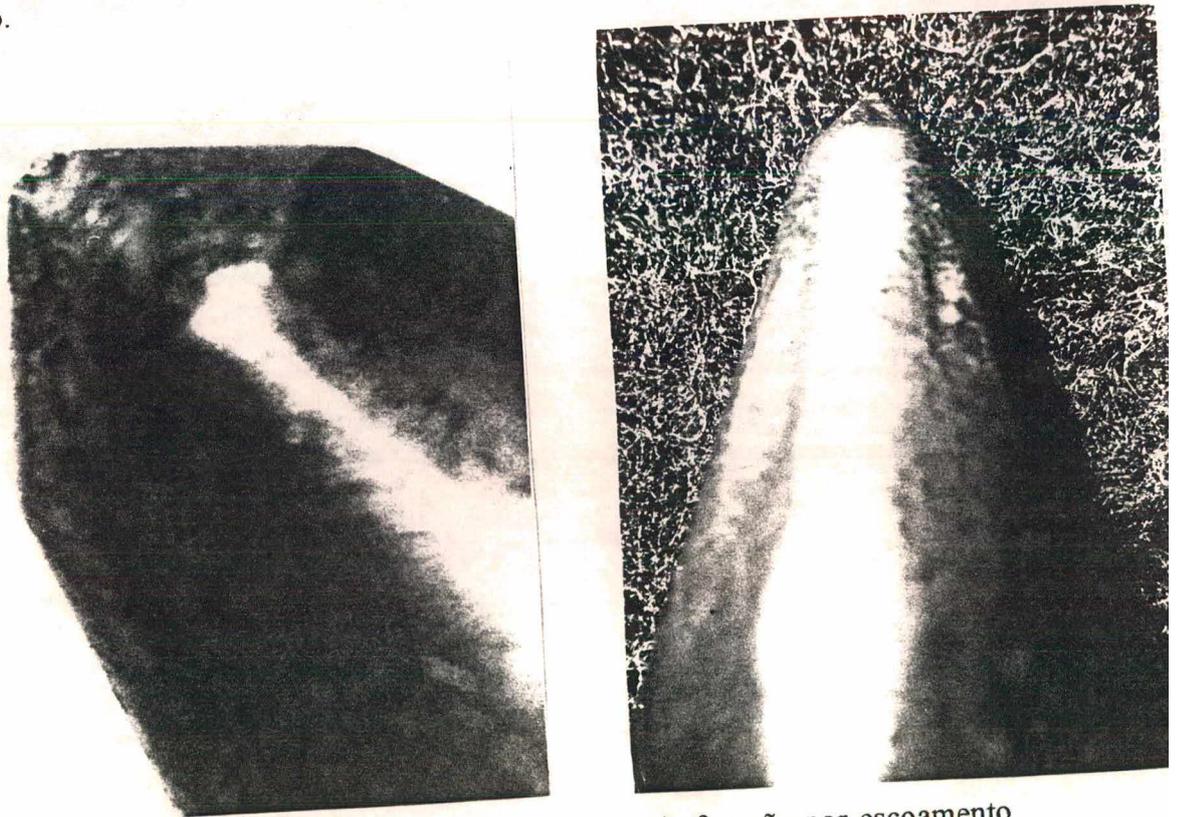


Figura 5.67 - Desgaste na ferramenta de furação por escoamento

Na utilização das ferramentas em condições normais o desgaste foi pequeno. Quando foram utilizadas condições de trabalho severas, observou-se um aumento considerável dos desgastes. Em virtude das observações, pode-se concluir que o final de vida da ferramenta ocorre quando a parte cônica poligonal se torna totalmente cônica, ou quando a parte cilíndrica poligonal da ferramenta não puder mais fabricar os furos com as tolerâncias exigidas.

O questão do desgaste da ponta da ferramenta pode ser solucionado com afiações sucessivas sem prejuízo para o processo. Em uma ferramenta que sofreu um impacto na ponta observou-se uma pequena quebra da ponta da ferramenta. Por esse motivo é aconselhável um cuidado especial com a ferramenta para evitar a ocorrência desses problemas.

A respeito das incrustações encontradas na superfície da ferramenta após uma série de furos, podemos tirar algumas conclusões. O lubrificante utilizado previne o aparecimento dessas pequenas incrustações de material da peça sobre a ferramenta. Mesmo assim depois de uma série de furos percebe-se o aparecimento das incrustações que devem ser retiradas com uma lima adiamantada ou lixa com granulometria fina. Em materiais mais moles como o cobre, essas incrustações aparecem mais cedo, pois existe maior facilidade de aderência.

5.7.5. ANÁLISE DO LUBRIFICANTE UTILIZADO

Através da análise da pasta lubrificante, em um ensaio de difração de raio X foi possível encontrar os componentes básicos que formaram o lubrificante.

O constituinte principal da pasta é o Sulfeto de Zinco obtido do minério de Wurtzita, responsável pela resistência da pasta a altas temperaturas. Foram encontradas também pequenas quantidades de bentonita, tudo isso aglomerado por um plastificante [59].

5.8. ROSQUEAMENTO POR CONFORMAÇÃO EM FUROS ESCO- ADOS

5.8.1. ANÁLISE DO MOMENTO TORÇOR NO ROS- QUEAMENTO POR CONFORMAÇÃO

Os ensaios para a determinação dos momentos torçores no rosqueamento de buchas escoadas foram realizados com machos de conformação M12 x 1,75 e M8 x 1,25 e machos de usinagem M12 x 1,75 (macho convencional nº 2). Foi utilizado um mandril para rosqueamento (Ref. ACCU 412N B16 do fabricante Seike Co.). A rotação utilizada foi de 95 min^{-1} . O furo escoado foi fabricado com ferramenta curta com colar e sob as mesmas condições de trabalho ($\text{rpm} = 1960 \text{ min}^{-1}$ e avanço de $0,063 \text{ mm/rot}$) em uma chapa de Aço 1020 de 1,9 mm de espessura.

- Gráfico do momento torçor no rosqueamento por conformação em furos escoados

O gráfico do momento torçor apresenta duas etapas. A primeira etapa consiste na execução da rosca e a segunda etapa se refere ao retrocesso do macho na rosca já formada. Observa-se que no gráfico de momento torçor no rosqueamento de buchas escoadas ocorre um pico de momento no início do processo causado pela penetração do macho no furo, não ocorrendo um patamar nesse nível de força, devido à pequena altura de rosqueamento. Na fase de retrocesso do macho ocorrem momentos torçores negativos causados pelo atrito entre ferramenta e peça (fig. 5.68).

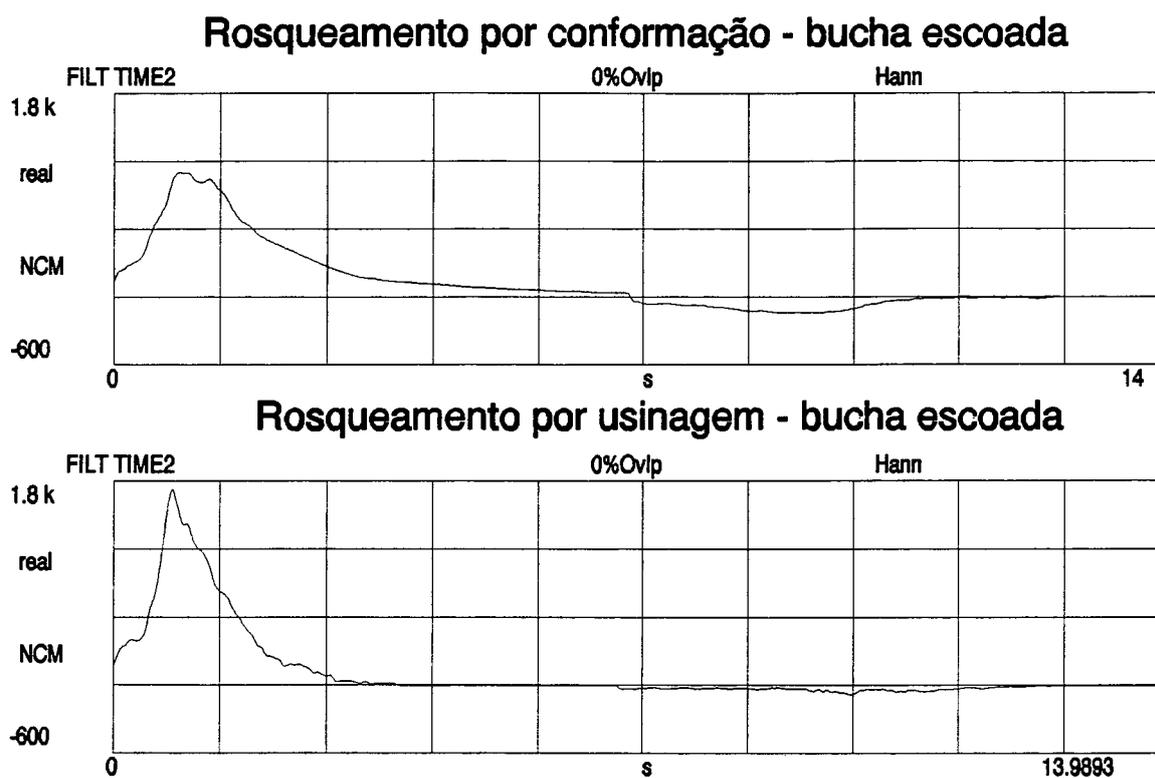


Figura 5.68 - Momento torçor no rosqueamento por conformação e por usinagem em furos escoados

- Momento torçor máximo durante o rosqueamento

Foram realizados sete ensaios para cada macho utilizado e computada a média desses resultados. Verifica-se que, ao contrário do que a literatura apresenta, os valores de momento torçor máximo na operação com machos de conformação é menor do que com machos de usinagem (fig. 5.69).

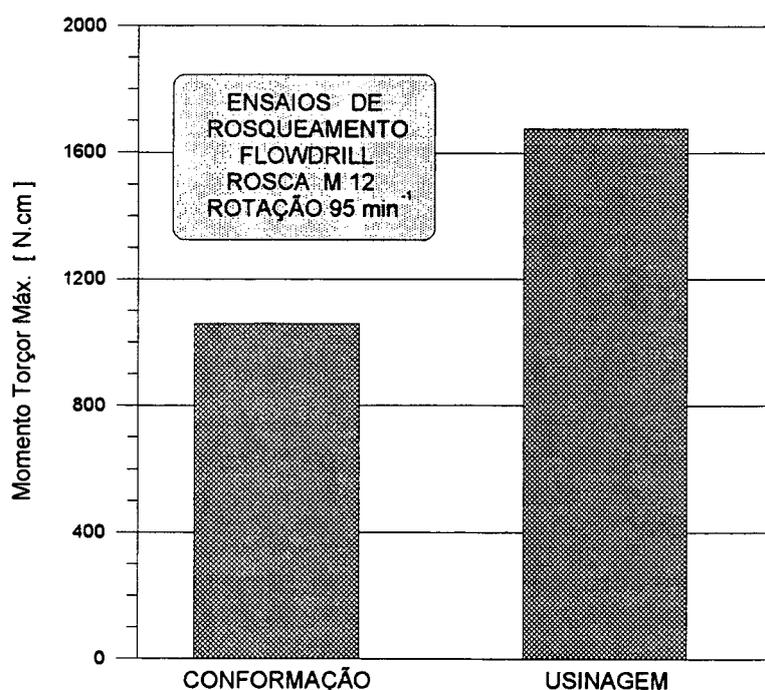


Figura 5.69 - Momento torçor máximo no rosqueamento Macho de conformação x Macho de usinagem

- Momento torçor máximo no retrocesso do macho

Os momento torçor máximo, durante o retorno do macho dentro da bucha já roscada, apresentou valores maiores para o macho de conformação em relação ao macho de usinagem (fig. 5.70). No caso das buchas escoadas acredita-se que haja uma pequena contração da mesma quando roscada com machos de conformação, devido ao calor gerado durante o processo de conformação. Este comportamento pode dificultar o retrocesso do macho aumentando os valores de momento torçor. Os machos de usinagem deveriam apresentar valores mais elevados, devido à maior dificuldade de retrocesso gerada pela má qualidade da superfície.

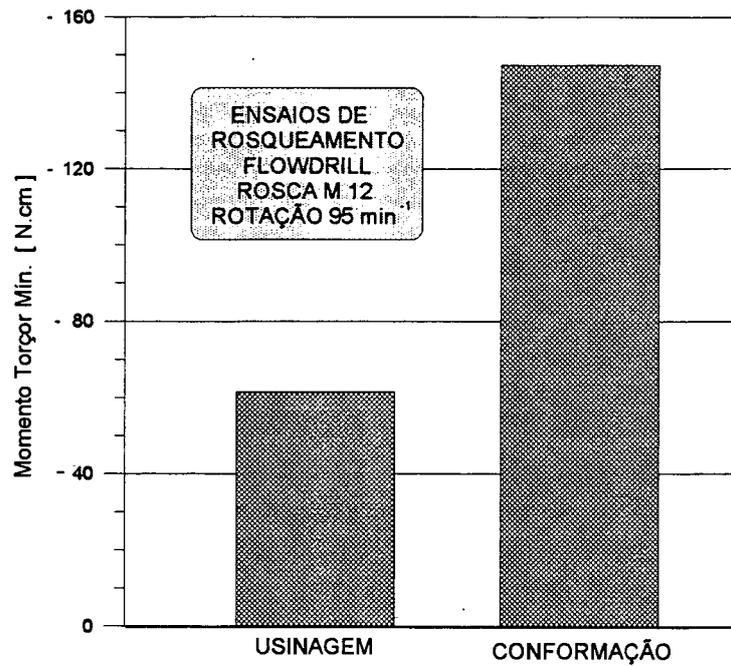


Figura 5.70 - Momento torçor máximo no retrocesso do rosqueamento - Macho de conformação x macho de usinagem

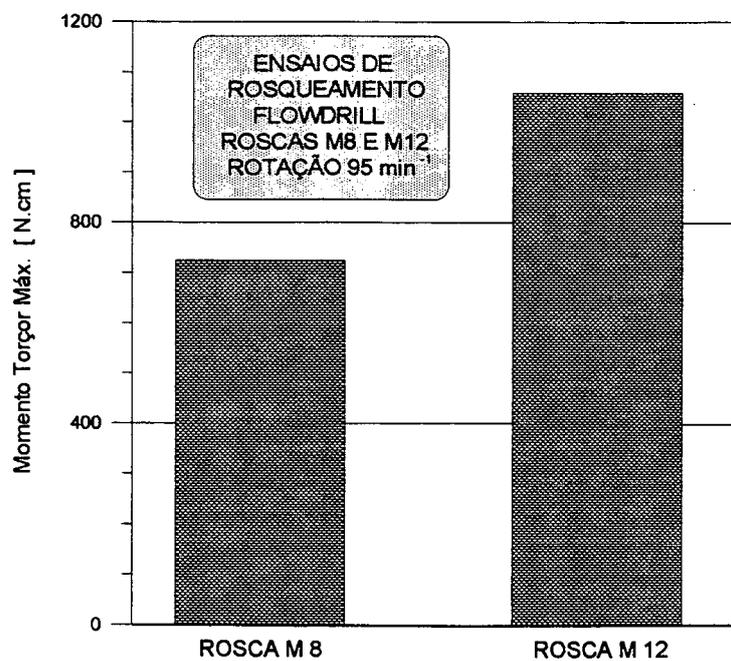


Figura 5.71 - Machos de conformação - Momento torçor máximo

5.8.2. RESISTÊNCIA DAS ROSCAS FORMADAS POR CONFORMAÇÃO E POR MACHOS DE USINA- GEM

No presente estudo procurou-se testar quantitativamente e comparativamente a resistência das roscas em buchas formadas por escoamento em chapas metálicas finas roscadas com machos de conformação e machos convencionais de usinagem [61].

Os corpos de prova são chapas de 3 mm de aço 1020. A rotação utilizada foi de 1900 min^{-1} e avanço de $0,047 \text{ mm/rot}$. Foi empregada uma ferramenta de furação por escoamento curta de diâmetro de 7,3 mm e os furos escoados foram roscados com um mandril compensador na mesma furadeira com um macho de usinagem de canais helicoidais $M8 \times 1,25$ e um macho de conformação $M8 \times 1,25$.

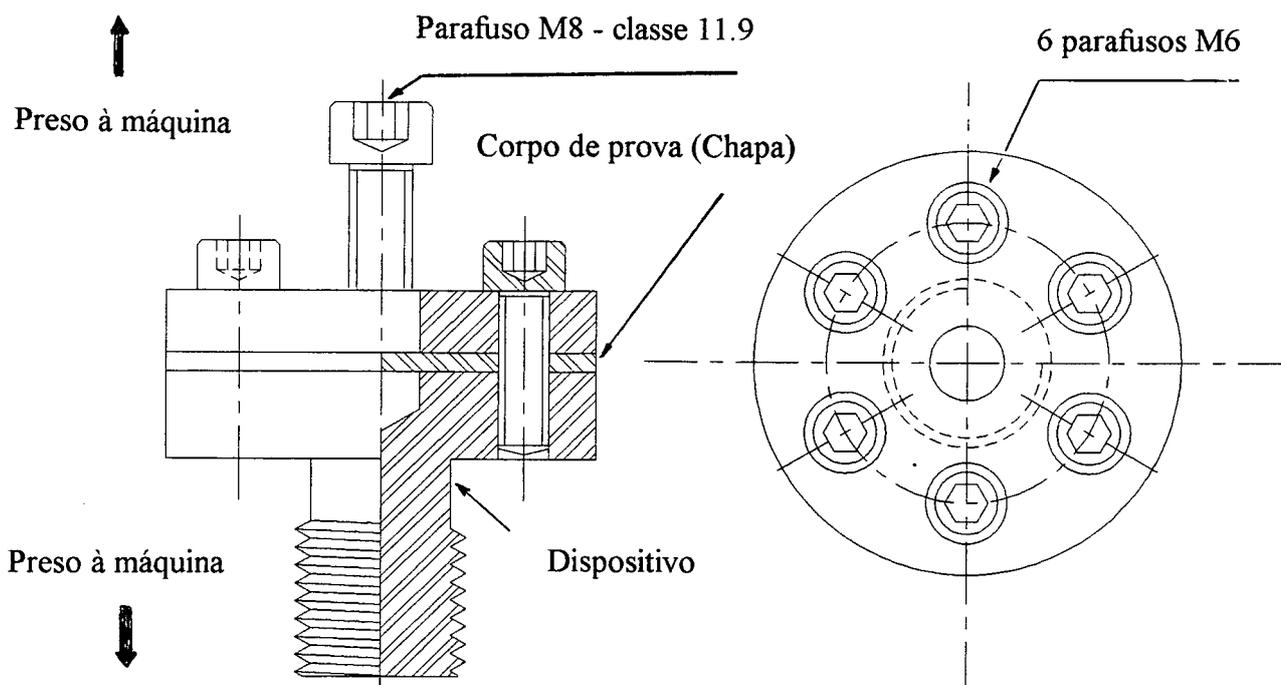


Figura 5.72 - Dispositivo de ensaio de tração em furos escoados roscados

Numa primeira parte as buchas escoadas e roscadas são levadas à ruptura em um ensaio de tração estática, sendo anotada a carga máxima à qual a rosca resiste. Isto é feito tracionando-se um parafuso de alta resistência (classe 12.9) roscado à bucha, que por sua vez é presa em um dispositivo especial (fig. 5.72).

Numa segunda parte, uma vez conhecida a grandeza da resistência da bucha para o rosqueamento por conformação e o rosqueamento por usinagem, mede-se a ocorrência de deformações plásticas para determinadas cargas. Nesta etapa tracionam-se as buchas até uma carga previamente estabelecida, da ordem de 10 kN a menos que a carga de ruptura encontrada na etapa anterior. Retira-se o carregamento e verifica-se com um parafuso se houve deformação plástica, pois neste caso o parafuso não irá mais roscar na bucha. Caso não tenha havido ainda deformação plástica aumenta-se o carregamento de 1 kN e repete-se o procedimento até que não seja mais possível o rosqueamento do parafuso, caracterizando assim a deformação plástica.

Foram ensaiadas seis buchas roscadas por usinagem e seis buchas roscadas por conformação a uma velocidade de 5mm/min em uma máquina para ensaios mecânicos universal Wolpert, devidamente referenciada no apêndice A.

Os corpos de prova têm as mesmas dimensões para evitar problemas de transmissão de calor, que podem causar variações sensíveis no diâmetro dos furos escoados.

As cargas de ruptura para as buchas ensaiadas estão no gráfico da figura 5.73, onde se apresenta também a média dos ensaios. No gráfico 5.74 apresentam-se as duas buchas, uma usinada e uma conformada, que foram usadas no ensaio de deformação com carregamento de carga progressivo.

O gráfico mostra que as roscas conformadas foram em média 10% mais resistentes que as roscas usinadas. As buchas conformadas atingiram, segundo a DIN 267, parte 4 [34], classes de resistência IT 8 a IT 9, enquanto que as buchas usinadas se situaram em classe IT 7.

Este aumento na resistência das buchas conformadas é creditado principalmente ao encruamento superficial causado pela deformação a frio ocorrida no rosqueamento por conformação. Outro fator de importância é a preservação do fibramento mecânico do material, pois ao invés de cortar o material da peça, o macho de conformação apenas desloca o material para formar os filetes.

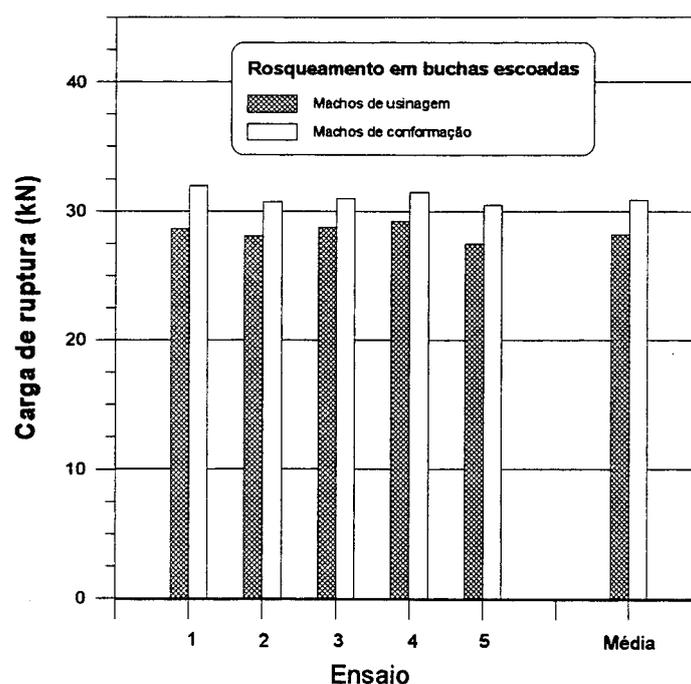


Figura 5.73 - Resultados dos ensaios de resistência a tração das roscas

A rosca feita por conformação apresenta também excelente acabamento superficial, não permitindo o surgimento de defeitos típicos de roscas usinadas.

Nos testes ficou muito claro que os mecanismos de ruptura para uma rosca conformada são diferentes dos da rosca usinada. Quando ocorria o rompimento das roscas usinadas, praticamente todos os filetes eram completamente arrancados pela raiz e ficavam presos ao parafuso de tração enquanto que a superfície da bucha testada ficava completamente lisa caracterizando, assim, uma ruptura por cisalhamento puro. Já no caso das roscas conformadas, apenas uma parte

dos filetes era arrancada ficando a outra parte incrustada na bucha, mostrando que para este processo ocorre inicialmente uma deformação do filete, e somente depois ocorre o cisalhamento.

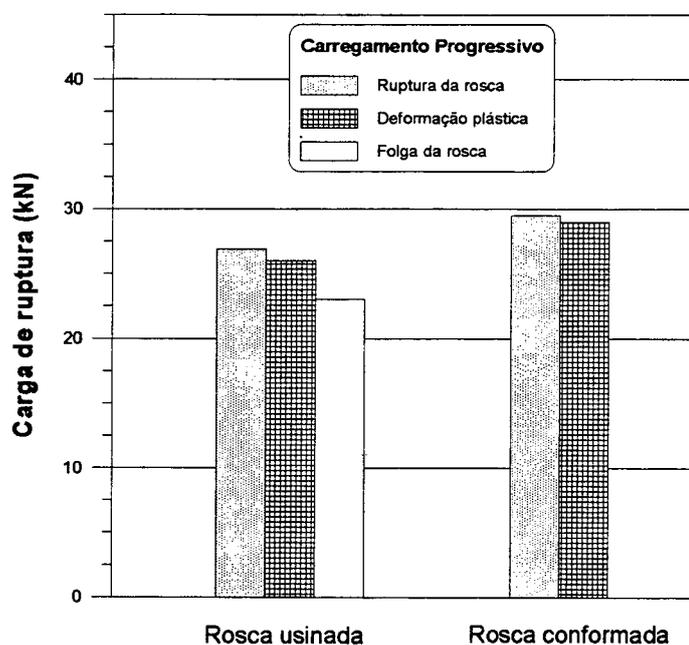


Figura 5.74 - Resultados de ensaios de resistência a tração com cargas progressivas

Outra observação bastante interessante e, que comprova o encruamento superficial na região dos filetes da rosca, foi constatada no teste para determinada carga. Pode-se ver pelo gráfico que aproximadamente aos 23 kN a rosca usinada apresentou uma folga no aperto do parafuso caracterizando, assim, o início da deformação plástica. A bucha conformada não apresentou este fato. Aos 26 kN o parafuso não roscava mais, mostrando que a deformação plástica havia acontecido, mas somente aos 27,5 kN a rosca rompeu. No caso da rosca conformada a deformação plástica ocorreu aos 29 kN, e aos 29,5 kN ela rompeu. Portanto, para a bucha conformada praticamente não houve deformação plástica. Isto era esperado, pois neste processo a rosca já é deformada plasticamente e encruada no processo de fabricação.

Com os furos prévios para os processos de rosqueamento por conformação e por usinagem deve-se esperar uma porcentagem de filete formado menor para as roscas usinadas,

mesmo com a diferença acima citada nas condições de fabricação dos furos prévios. Entretanto duas buchas usinadas e duas conformadas foram cortadas e, com um microscópio de medição com aumento de 30 \times , calculou-se que as roscas conformadas tinham aproximadamente 75% do filete formado e as roscas usinadas 65% do filete, estando assim ambas dentro dos limites usuais de fabricação.

Finalmente deve-se observar que a forma como é efetuado o rosqueamento, se manual ou em máquina, tem importância nos resultados de resistência para roscas em chapas finas, pois para o rosqueamento manual geralmente tem-se uma rosca não ortogonal à superfície da peça. Isto gera na tração um gradiente de tensões cisalhantes que eventualmente pode levar à ruptura prematura dos filetes. Entretanto seriam necessários testes para quantificar esta influência.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

O presente trabalho nos permite concluir que o processo de furação por escoamento, utilizando avanços automáticos é perfeitamente possível e apresenta resultados satisfatórios quando da utilização de parâmetros tecnológicos adequados.

As velocidades de conformação do processo de furação por escoamento podem chegar até 3 vezes as velocidades de corte praticadas na furação com brocas helicoidais. Isto faz com que haja uma grande redução dos tempos de processo.

As forças de avanço e momento torçores exigidos pelo processo de furação por escoamento são bem superiores aos exigidos pela furação por usinagem e para máquinas convencionais, sendo que uma das limitações do processo certamente é a potência da máquina-ferramenta.

A força de avanço do início da fase de escoamento ($Ff1$) apresenta um pico. A amplitude da força de avanço ($Ff1$) é fortemente influenciada pela espessura e resistência da chapa. A força de avanço ($Ff1$) é também influenciada pelo avanço (f), que determina os resultados da qualidade dos furos. A rotação influencia a geração de calor através do atrito, determinando o início da fase de escoamento.

A força de avanço ($Ff2$) que ocorre no final da fase de escoamento também é influenciada pelos mesmos fatores que influenciam a força de avanço ($Ff1$).

Já o momento torçor (Mt) máximo da fase de escoamento é fortemente influenciado pela área de contato entre a ferramenta e a peça, o que torna o processo impraticável para determina-

das combinações de avanço e rotação em chapas muito grossas (de 4,5 mm a 8 mm).

O estudo da qualidade das rebarbas inferiores formadas pelo processo de furação por escoamento nos mostrou que ela é decorrente da deformação e do escoamento do material da chapa. Para pequenas espessuras de chapa domina a deformação da chapa. À medida que se trabalha com espessuras maiores, o escoamento do material domina. Com isso chegou-se à conclusão que em chapas mais finas existe uma grande dificuldade de execução dos furos por escoamento. Em chapas mais grossas existe uma maior facilidade, devida à maior geração de calor, contudo em algumas situações o aumento do momento torçor leva ao travamento da ferramenta na peça.

Percebeu-se também a influência fundamental do lubrificante como inibidor da ocorrência de incrustações na face de ferramenta, o que levaria à piora da qualidade do furo.

A furação por escoamento em outros materiais além do aço carbono é possível. Existe porém a necessidade da adequação de dados tecnológicos para cada tipo de material.

Grandezas como a condutividade térmica e propriedades mecânicas dos materiais influenciam fortemente os padrões de força de avanço e momentos torçores nos diversos materiais.

As temperaturas medidas durante o processo de furação por escoamento ficaram em torno de 768°C na borda do furo.

A furação por escoamento no alumínio não mostrou bons resultados devido às suas características de grande deformabilidade a quente, mas acredita-se que, com a utilização da ferramenta com ponta estriada, minimizando a temperatura do processo, se consigam melhores resultados. Em compensação o cobre e o aço inoxidável apresentaram resultados satisfatórios. O cobre apresentou seus melhores resultados na combinação de baixas rotações e altos avanços. Já o aço inoxidável apresentou seus melhores resultados em altas rotações e baixos avanços.

Mostrou-se também que, além da furação por escoamento utilizando-se avanços automá-

ticos, também é possível a realização de furos com força manual e força de avanço constante (F_p). Os furos produzidos manualmente dependem essencialmente da força aplicada pelo operador e da condição de cada operador. Já em furos produzidos com força de avanço constante (F_p), a própria força aplicada é a variável que mais influencia no processo.

Uma observação importante diz respeito aos gráficos de forças na furação por escoamento encontrados na literatura e referenciados neste trabalho. Esses gráficos certamente não podem ser produzidos com força de avanço constante, como demonstrado. A forma das curvas de força de avanço e momento torçor exibidas são produzidas certamente por avanços automáticos, como mostram todos os gráficos do processo exibidos neste trabalho.

Com relação aos diversos tipos de ferramentas testadas, as pequenas diferenças de amplitude encontradas podem ser explicadas pela geometria diferenciada de cada uma, e não interferem no processo de furação por escoamento.

Chapas duplas (geminadas) apresentam resultados de trabalho satisfatórios e podem certamente ter grandes aplicações na indústria metal-mecânica.

A posição do furo no corpo de prova tem alguma influência nos resultados de força de avanço, pois os volumes para condução de calor são diferentes em cada ponto do corpo de prova. Já o momento torçor é pouco influenciado, pois a maior influência é decorrente da área de contato entre a peça e a ferramenta. As diferenças de valores encontrados não representam alterações no comportamento geral de cada variável.

A resistência das roscas produzidas em buchas formadas por escoamento mostraram resultados diferenciados para as ferramentas de usinagem e de conformação. Os furos roscados com machos de conformação apresentaram resultados aproximadamente 10 % maiores que os resultados apresentados pelos machos de usinagem, e se encontravam de acordo com os valores indicados pela norma Din 267 - parte 4. O motivo desse aumento é devido ao encruamento do filete conformado e também pela manutenção das fibras mecânicas do material

Os momentos torçores máximos apresentados pela ferramenta de rosqueamento por usinagem apresentaram um acréscimo de aproximadamente 60% em relação aos momentos torçores apresentados pela ferramenta de rosqueamento por conformação. Já os momentos torçores da fase de retrocesso da ferramenta apresentaram valores duas vezes maiores para as roscas fabricadas por conformação, contrariando a literatura existente.

CAPÍTULO 7

SUGESTÕES PARA A CONTINUIDADE DO TRABALHO

A furação por escoamento trabalha com altas velocidades de conformação, como visto neste trabalho. Sugere-se que se realizem outros ensaios com ferramentas de furação por escoamento ampliando a faixa de velocidades de conformação. Deve-se estudar os resultados de trabalho e as máximas velocidades que produzem resultados satisfatórios.

Atualmente existe um grande aumento na utilização de chapas com espessuras abaixo de 1 mm em diversas aplicações, principalmente na indústria automobilística e de bens de consumo. Esse crescimento resultou no maior interesse na união segura de chapas com essas espessuras. As publicações existentes mencionam que desde há muito tempo a união aparafusada em chapas abaixo de 1 mm é falha. Nesse tipo de chapa as operações de furação por escoamento, rosqueamento por conformação e colocação do parafuso na posição da união requerem altos recurso de fabricação, tornando a maioria das utilizações anti-econômicas.

Normalmente as ligações com parafuso são construídas como ligações finais de atrito, onde é exigida uma alta carga de cisalhamento do parafuso. Em contrapartida, as uniões por parafuso em chapas finas são por acasalamento. A causa para este comportamento diferente é que em chapas finas nem a seção transversal nem a resistência do parafuso e chapa são suficientes para originar forças de atrito suficientemente grandes entre as superfícies. As forças a serem transmitidas deste modo agem sobre a haste do parafuso.

Kretschmer [3] desenvolveu um projeto de um parafuso especial (EJOT) que atua como elemento de fixação, mas também age como uma ferramenta para formar o furo e executar a rosca em uma única operação. A figura 6.1 mostra o parafuso que pode ser fabricado entre dimensões de M3 a M6. Propõe-se a fabricação desse tipo de parafuso para realização de testes das forças transversais (F_a) (fig 6.2) e forças perpendiculares (F_z) (fig 6.3) suportadas pela união. Também é possível descobrir se este tipo de parafuso pode realmente ser aplicada nesse tipo de união.

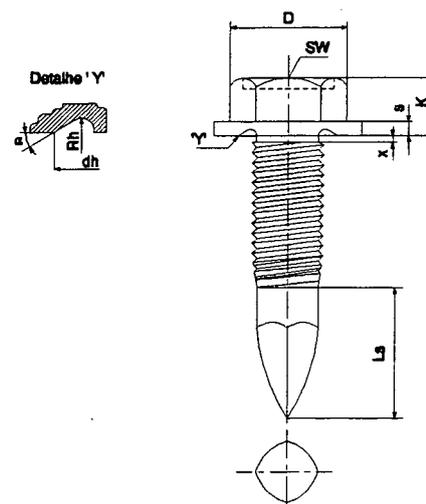


Figura 6.1 - Parafuso EJOT

Propõe-se também a fabricação de ferramentas de furação por escoamento produzidas em Aço 4340. O objetivo dos ensaios seria a determinação da condição de se fabricar furos com ferramentas produzidas com um material muito menos resistente a altas temperaturas e desgaste. Fatores como vida da ferramenta e condição dos furos produzidos poderiam ser estudados.

Outro importante ponto onde os estudos podem ser aprofundados está na análise das características metalográficas dos diversos materiais antes e depois dos processos de furação por escoamento e rosqueamento por conformação. Propõe-se também que se verifique o comportamento da estrutura do material com alteração do patamar da temperatura do processo causada pelo aumento da espessura das chapas. São características importantes para um correto e seguro uso desse processo em aplicações que exigem resultados muito confiáveis.

Podem também ser abordados por outros trabalhos aspectos como a necessidade ou não de pré-furos quando se realiza o processo de furação por escoamento em chapas mais grossas. Certamente é possível a realização de furos em chapas mais grossas sem a necessidade de pré-furo, mas desde que existam dados tecnológicos confiáveis.

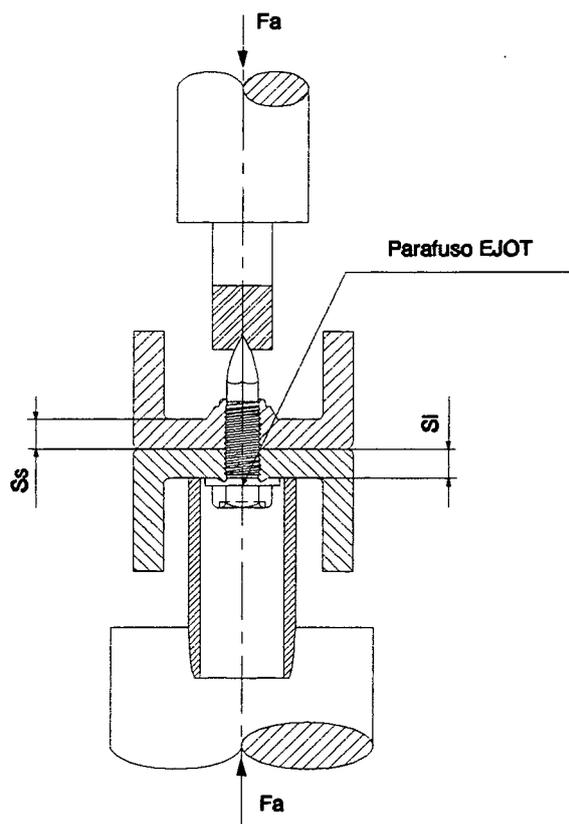


Figura 6.2 - Dispositivo Fa

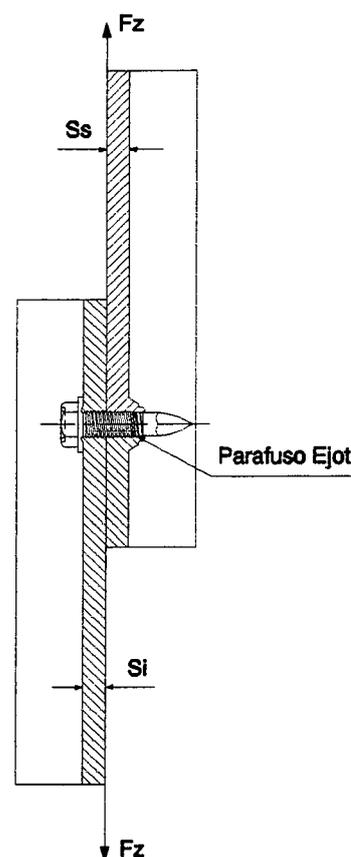


Figura 6.3 - Dispositivo Fz

Outro aspecto que pode levar a uma melhoria do processo de furação por escoamento é a utilização de ferramenta com ponta estriada na furação de chapas mais espessas ou chapas que apresentam algum tipo de revestimento e até mesmo oxidação.

A empresa holandesa Flowdrill, responsável pela doação das ferramentas utilizadas nos ensaios, mostrou grande interesse em obter maiores resultados de resistência da tração de roscas conformadas em furos escoados. Propõe-se a fabricação de dispositivos para realização de ensaios em diversos materiais e espessuras de chapa.

A empresa sondou a possibilidade da realização de ensaios de resistência a tração em roscas fabricadas em furos escoados de 20 mm de diâmetro produzidos em chapas de espessura de 10 mm realizados com furação por escoamento utilizando avanços automáticos, sem pré-furo e em uma única operação. A intenção desses ensaios é demonstrar as classes de resistência que

as uniões podem suportar de acordo com a Norma DIN 267 - parte 4, com o objetivo de garantir a seus clientes dados tecnológicos confiáveis.

Existem empresas fabricantes das ferramentas de furação por escoamento interessadas em testar novas classes de metal duro empregados na fabricação das ferramentas e também ferramentas fabricadas de outros materiais. A intenção deve ser estudar o desgaste das ferramentas, vida e resistência mecânica. Como o processo é relativamente novo existe um grande interesse no desenvolvimento tecnológico do mesmo.

Outro ponto importante que merece destaque é a divulgação dos trabalhos aqui apresentados, visto que o processo é novo no mercado mundial e existem poucas informações sobre o assunto. Sugere-se a produção de artigos para publicação em revistas técnicas, congressos e seminários que possibilitem um maior número de pessoas entrarem em contato com o processo. Dentro desse mesmo tópico é importante a apresentação desse trabalho em empresas usuárias potenciais do processo.

Trabalhos para capacitação tecnológica de indústrias em aplicações práticas devem gerar grande interesse nos próximos anos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] SHIKATA, H., DEVRIES, M. F. An experimental of sheet metal drilling. *Annals of the CIRP*, v. 29, p. 85-88, jan.1980.
- [2] FORMAGE de bossage sur toles fines par repoussage. *Machine Moderne*, n. 834, p. 73-74, Avr. 1979.
- [3] KRETSCHMER, G. Fliesslochformen und Gewindefurchen : mit einem Werkzeug, dem Verbindugselement selbst. *wt Werkstattstechnik*, v. 81, p. 633-636, 1991.
- [4] KRETSCHMER, G. *Fliesslochformen von Blechdurchzügen*. Siegen : U Siegen, 1980. 70 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universitaet - Gesamthochschule - Siegen, 1980.
- [5] KRETSCHMER, G. Fliesslochformen. *wt-Z.ind. Fertig.* , v. 67, p. 667-669, 1977.
- [6] KRETSCHER, G. Rolltapping threads into flowdrilled bushes. *Strips Sheets Tubes*, v. 2 , p. 62-64, 1984.
- [7] KRETSCHMER, G. Furchen von Gewinde in Fliesslochgeformten Durchzuegen bei dünnen Werkstücken. *Maschinenmarkt*, v. 89, n. 98, p. 2329-2332, 1983.
- [8] BUSHES formed quickly and economically in thin metal by flowdrilling process. *Engineering Materials and Design*, não paginado, [19--].
- [9] BACK, David. J. Friction, heat form integral bushings : flowdrilling reduces boss formation to one step. *Design News*, p. 124, Aug. 1987.
- [10] KRETSCHMER, G. *Fliesslochformen von Blechdurchzuegen*. Bamberg : Meisenbach, 1981, 8p.

- [11] BAUER, D., KRETSCHMER, G. Umformarbeit beim Fließlochformen. *wt-z. ind. Fertig.*, v. 2, p. 451-454, 1982.
- [12] KRETSCHMER, R., WEISBERG, E. Innengewinde durch Umformen. *Werkstattstechnik*, v. 56, n. 2, p. 61, 1966.
- [13] ANDREICHIKOV, O. S., STESHKOV, A. E. Cross-sectional forms of backed-off fluteless taps. *Machines & Tooling*, v. 43, n. 1, p. 53-56, [19--].
- [14] SPANLOS : Gewindefurchen, eine Alternative zum Gewindebohren. Aachen : WZL, [19--].
- [15] DRABUS. *Now you can drill over 150.000 holes with a single drabus Sky flow-drill*. Ruelzheim : RMB, 1993. não paginado.
- [16] SOMEX. *Fluopercage, Fiessbohren, Flowdrilling*. França : Somex, 1990. não paginado.
- [17] WEINGAERTNER, Walter Lindolfo, LOPES, João Carlos Oliveira Lopes et al. *Análise de forças na furação processo - Flowdrill*. Primeiro relatório. Florianópolis : LMP, Flowdrill, 1992, 31 p.
- [18] WEINGAERTNER, Walter Lindolfo, LOPES, João Carlos Oliveira et al. *Forces Analysis in flowdrilling : First report*. Florianópolis : LMP, Flowdrill, 1992.
- [19] KRETSCHMER, G. Kenngrößen beim Gewindefurchen. *wt-z. ind. Fertig.*, v. 68, p. 83-86, 1978.
- [20] KRETSCHMER, G. Mit rotierendem kegeligen Dorn fließlochformen an Bauteilen. *Maschinenmarkt*, Wuerzburg, v. 84, n. 2, p. 27-53, 1978.
- [21] JÄGER, H. Gewindefurchen auf Drehautomaten. *wt-z. ind. Fertug.*, v. 60, n. 8, p. 432-434, 1970.
- [22] NOVOSEL, Tom. Tapping without chips. *American Machinist*, p. 103-105, Oct. 1975.

- [23] OXFORD JR., Carl. *Cutting tools/ taps*. [S.l : s. n.], 1977. não paginado.
- [24] KRETSCHMER, G. *Design performance of the flowdrilled thread bush*. Cheshire : Flowdrilling, 1984. não paginado.
- [25] NOVOSEL, Tom. Form those threads at drilling speeds. *Machine and Tool Blue Book*, v. 42, n. 5, p. 70-75, May 1976.
- [26] MENSCHAKOV, V. M. et al. Effect of lubrication on chipless thread-forming. *Machines & Tooling*, v. 42, n. 2, p. 59-61, 1971.
- [27] NELIS, R. A. Tapping torque requirements. *American Machinist*, v. 106, n. 15, p. 71-72, Jul.1962.
- [28] KRETSCHMER, G. Fließlochformen und gewindefurchen von Blechen aus legierten Stählen. *wt. Werkstattstechnik*, v. 77, p. 367-369, 1987.
- [29] RYZHOV, E. V. et al. Accuracy of threads produced by plastic deformation. *Machine & Tooling*, v. 42, n. 7, p. 38-40, 1971.
- [30] WERKZEUGMASCHINEN UND WERKZEUG *Gewindeformen*. Dresden : WMW, 1987, 9 p.
- [31] DEKKERS, J. D. *Flowdrilling - a new manufacturing process*. Utrecht : Flowdrill b.v. Holanda, 1988 , 32p.
- [32] KRETSCHMER, G. Schmiermittel macht's möglich Fließlochformen und Gewindefurchen zum Herstellen von Durchzügen in Bauteilen eignet sich auch für Aluminium. *Maschinenmarkt*, v. 93, n. 18, p. 80-83, 1987.
- [33] FANTIN, Jean Pierre. Ensaio com machos : em busca de bons resultados na usinagem. *Máquinas e Metais*, p. 58-60, set. 1992.
- [34] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, DIN 267 - Part 4. *Mechanische Verbindungselemente; technische Lieferbedingungen; Festigkeitsklassen für Muttern*, Deutsche , Aug. 1983.

- [35] WEINGAERTNER, Walter Lindolfo , LOPES, João Carlos Oliveira et al. Furação por escoamento e rosqueamento por conformação. In SEMANA DA CONFORMAÇÃO DA ABM, 1 , 1993, Joinville: *Anais...* Joinville : ABM, 1993, p. 521-532.
- [36] WEINGAERTNER, Walter Lindolfo , LOPES, João Carlos Oliveira et al. Furação por escoamento . CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 12, 1993, Brasília : *Anais...* Brasília : CAPES, p. 1623-1626.
- [37] SPESCHA, G. VOLLE, E. *Piezoelektrische Messgeraete*. Winterthur : Kistler Instrument AG, [19--], 27p.
- [38] WEINGAERTNER, Walter Lindolfo, SCHROETER, Rolf Bertrand et al. *Análise de forças na usinagem de alumínio e de cobre*. Relatório interno, Florianópolis : UFSC, 1992.
- [39] SCHROETER, R. B. *A largamento de precisão em alumínio aeronáutico com ferramentas de gume único regulável*. Florianópolis, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) , Universidade Federal de Santa Catarina, 1989, 113 p.
- [40] SCHROETER, R. B., PAULETTI M.C. *Manual de forças de furação e torneamento* - Relatório Interno , Florianópolis : UFSC, LMP, 1992.
- [41] MOREIRA, L. T. Programa de aquisição de forças para a furação. CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 1985, São Carlos, *Anais...* São Carlos,. 1989.
- [42] KOENIG, W. *Fertigungsverfahren : Drehen, Fraesen, Bohren*. Duesseldorf.: VDI, 1981. band 1.
- [43] MIRA, Fausto Moreno, COSTA, Hélio de Brito. *Apostila de conformação de chapas*, Florianópolis : UFSC, 1991,

- [44] STEMMER, C. E. *Ferramentas de Corte II*. Florianópolis : Editora da UFSC, 1992, 326 p.
- [45] BOEHS, L. *Apostila de metodologia de ensaios sistemáticos de usinagem para operações de furação*. Florianópolis : UFSC, 1989, 54 p.
- [46] SCHNEIDER, C. A. ALBERTAZZI, A. *Apostila de técnicas de pesquisa experimental*. Florianópolis : UFSC, 1991.
- [47] ROCHA, A. S. *Determinação de um modelo de força de usinagem para a furação, a partir do modelo de força de usinagem do torneamento*. Florianópolis, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) , Universidade Federal de Santa Catarina, 1985, 117 p.
- [48] FERRARESI, D. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. São Paulo : Edgar Blucher, 1977, v. 1, 751 p.
- [49] STEMMER, C. E. *Ferramentas de Corte I*. Florianópolis : Editora da UFSC, 1987, 203 p.
- [50] ROY, A.K., RAY, T. D. et al. Drilling of thick hadfield manganese steel plate. *Materials Forum*, v. 16, p. 57-61, 1992.
- [51] ZAIMA, S. YUKI, A. et al. A study on walking phenomenon of drill in drilling aluminum sheet. *Journal Japan Institute of Light Metals*, v. 18, n. 8, p. 433-438, 1968.
- [52] ZELENTSOV, V. V. The lobing of drilling holes. *Soviet Engineering Research*. v. 1, n. 10, p. 46-48, 1981.
- [53] AS IMPLICAÇÕES da reafiação. *Máquinas e Metais*, p. 38-45, nov. 1982.
- [54] BORADACHEV, N. M. KAZARINOV, Y. I. A theoretical method of determining the limiting state of a plate with hole. *Strength of materials*. v. 22, n. 10, p.1381-1387, Jun. 1991.

- [55] REINHALL, P. G., STORTI, D. W. Modeling and analysis of the dynamics of a drill penetrating a thin plate. *Transactions of the ASME*. v. 53, p. 690-694, 1986.
- [57] KOENIG, W. *Fertigungsverfahren: Abtragen*. Dusseldorf : VDI, 1981, band III
- [58] BOLLHOF-DODI. *Sistemas de fixação e montagem*. Jundiaí: 1981. não paginado
- [59] OLIVEIRA, C. L. *Análise do lubrificante para a furação por escoamento* - Relatório interno, Florianópolis : UFSC-LMP/IPT, 1993
- [60] SCHROEDER, E. Análise da temperatura na furação por escoamento. CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 1993, Santa Maria : Anais..., Santa Maria, 1993.
- [61] SILVA, D. C., CARDOSO Fº, O. D. Rosqueamento por conformação em chapas finas. CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 1993, Santa Maria : Anais..., Santa Maria, 1993.
- [62] CARSLAW, H.S. JAEGER, J. C. *Conduction of heat in solids*. Oxford : Oxford University Press, 1959, 510p.
- [63] RYKALIN, N. N. UGLOV, A. KOKORA, A. *Laser machining and welding*, Oxford : Pergamon Press, 1978, 310p..
- [64] ROSENTHAL, D. Mathematical Theory of heat distribution during welding and cutting. *Welding Journal (Research Supplement)*, v.20, n. 5, p.220-234, 1957.
- [65] RYKALIN, N. N. *Berechnung der Waermevorgaenge beim Schweissen*. Berlim : VEB Verlag Technik, 1957, 326p.
- [66] LOPES, J. C. O., WEINGAERTNER, W. L., "Furação por escoamento. Revista Máquinas e Metais, São Paulo, SP, n. 337, abr. 1994, pg. 54-57.

APÊNDICE A

MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS

FURADEIRA RADIAL

A máquina-ferramenta utilizada nos ensaios foi uma furadeira radial CSEPEL MODELO 75/1500. Esta furadeira permite uma rotação máxima da árvore de 1900 rpm, sendo as velocidades reguladas de maneira escalonada (série 10) nas seguintes vinte e uma rotações :

19 - 23,6 - 30 - 37,5 - 47,5 - 60 - 75 - 95 - 118 - 236
300 - 375 - 475 - 600 - 750 - 950 - 1180 - 1500 - 1900

As velocidades de avanço da árvore não obedecem a uma série geométrica e podem se reguladas escalonadamente, segundo as seguintes possibilidades (mm/rot) :

0,047 - 0,063 - 0,094 - 0,125 - 0,187 - 0,250
0,375 - 0,500 - 0,750 - 1,000 - 1,500 - 2,00

Como características da máquina-ferramenta empregada pode-se citar a sua flexibilidade, rigidez, simplicidade e facilidade de operação.

- Peso - 6.715 kg
- Cone Morse - n. 5
- Motores
 - Motor principal - 11 kW
 - Motor da bomba de óleo - 0,125 kW
 - Motor de elevação e descida - 2,2 kW
 - Motor de fixação do carro - 0,6 kW

DINAMÔMETRO PIEZÉLETRICO

A plataforma piezométrica utilizada dispõe de quatro canais de saída capazes de mostrar a força de avanço (F_f), o momento torçor (M_d) e duas componentes normais ao avanço. Na furação estas duas forças são iguais em magnitude, mas em sentidos opostos, de forma que se anulam. O dinamômetro piezométrico foi protegido da ação do fluido de corte durante os ensaios por capas plásticas.

Dados técnicos:

Fabricante	-	Kistler Instrumentos A.G.	
Modelo	-	9273	
Número de série	-	142405	
		Fz	Md
Faixa de indicação		-5...20 kN	-100...100Nm
Sensibilidade		-1,94 p C/N	-1,65 p C/N
Linearidade		$\leq \pm 1\%$ VFE	$\leq \pm 1\%$ VFE
		(FSO)	(FSO)
Histerese		$\leq \pm 1\%$ VFE	$\leq \pm 1\%$ VFE
Incerteza de medição		$\leq \pm 1\%$	
Frequência natural		3 kHz	
Temperatura de utilização		0...70°C	
Impedância de entrada		$> 10^{13} \text{ T}\Omega$	
Diafonia			
		$F_z \Rightarrow F_{x,y}$	$\leq \pm 1\%$
		$F_x \Leftrightarrow F_y$	$\leq \pm 3\%$
		$F_{x,y} \Rightarrow F_z$	$\leq \pm 3\%$

AMPLIFICADOR DE SINAIS

Tem a finalidade de converter sinais de carga elétrica em tensões proporcionais aos carregamentos mecânicos.

Dados técnicos

Fabricante	-	Kistler Instrumentos A.G.
Modelo	-	5006
Faixa de medição		$\pm 10 \dots 500.000$ pC
Sensibilidade mecânica		$0,1 \dots 11.000$ pC/unidade
Sinal parasita do cabo		$\sim 3 \cdot 10^{-5}$ pCrms/pF
Impedância de entrada		$\cong 100$ T Ω
Faixa de frequência		$0 \dots 180$ kHz
Linearidade		$\leq \pm 0,05\%$
Incerteza de medição		$\leq \pm 1\%$
Temperatura de utilização		$0 \dots 50^\circ\text{C}$

CONTROL SYSTEMS ANALYSER

Dados técnicos:

Fabricante	-	Hewlett-Packard
Model	-	3563 A

UNIDADE DE AQUISIÇÃO AUTOMÁTICA DE DADOS

Responsável pela conversão do sinal analógico em digital.

Dados técnicos:

Fabricante	-	Hewlett-Packard
Modelo	-	3497 A
Impedância de entrada	> 10 ¹⁰	(escala de 1 a 10 V)
		100 Mohms ± 0,5%
		(escala 100 V)
Resolução	10 mV	(para 3 dígitos, (escala 10V)
Número de aquisições por segundo		12

COMPUTADOR

Dados técnicos :

Fabricante	-	Hewlett - Packard
Modelo	-	Hp-85
Memória RAM	-	32 Kbytes
Instalado com computador IBM AT compatível		

MICROCOMPUTADOR

Dados técnicos

Fabricante	-	Samsung
Modelo	-	386 SX - 25 MHz
RAM memory	-	2 Mbytes

MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS

Dados técnicos

Fabricante	-	Zeiss
Modelo	-	ZMC 550 - CAA
Incerteza de medição	-	1 μ m
Faixa de medição	-	X = 550 mm
		Y = 500 mm
		Z = 450 mm

Cabeçote medidor com apalpador de contato intercambiável.

MÁQUINAS DE ENSAIOS DE TRAÇÃO UNIVERSAL

Dados técnicos

Fabricante	-	OTTO WOLPERT-WERKE GmbH
Modelo	-	Universalprüfmaschine 10 TZZ 707
Carga máxima	-	100 kN
Curso máxima	-	1.500 mm

RUGOSÍMETRO

Dados técnicos

Fabricante	-	Feinprüf Perthen GmbH
Modelo	-	Perthometer S8P
Comprimentos de medição	-	0,4 - 1,25 - 4,0 - 12,5 - 40 mm
Faixas de medição	-	12,5 - 62,5 - 125 - 250 - 625 - 2500 μm
Cut-off	-	0,025 - 0,08 - 2,5 - 8,0 mm
Parâmetros	-	Ra, Rt, Rz, Rq, R _{máx} , R _{pm} , R _p , R _{3Z} , R _c , Pt Wt, S _m , t _p , S _k , S, T, Δa , Δq , λa , λq , L _r

LUZ ESTROBOSCÓPICA

Dados técnicos

Fabricante	-	Strobotac
Modelo	-	1531
Faixa de aferição	-	110 - 25000 min^{-1}

TERMOPAR

Tipo K - Liga Chromel - Alumel

Sensibilidade para $0,1^{\circ}\text{C}$ = 4,0 m/V

Norma - DIN 43710

Faixa de operação = 0 a 1000°C

Incerteza de medição = $\leq \pm 2\%$

APÊNDICE B

COMPOSIÇÃO QUÍMICA / CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

DOS MATERIAIS UTILIZADOS

O material das peças utilizadas durante os ensaios de furação por escoamento para a determinação das fases do processo foi o Aço 1020 com espessuras de 2 e 3 mm. As principais características dos corpos de prova são dadas na tabela abaixo.

	CHAPA 2 mm	CHAPA 3 mm
DUREZA VICKERS	102 HV	120 HV
DUREZA ROCKWELL	58 RB	69 RB
TENSÃO LIMITE DE RESISTÊNCIA	358 MPa	318 MPa
CLASSIFICAÇÃO ABNT	NÚMERO 3 1/4 DURA	NÚMERO 4 MOLE

Para os demais ensaios realizados foram utilizados os seguintes materiais : aço 1020, aço inoxidável, alumínio e cobre com diferentes espessuras. Foram realizados testes de tração e dureza e os resultados são mostrados abaixo, junto com a provável composição química para cada material.

ALUMÍNIO

ESPESSURA [mm]	HB*
3.0	37

COBRE

ESPESSURA [mm]	HB*
3.2	73

* Para alumínio e cobre, os testes de dureza foram feitos usando os testes de dureza Brinell, com as seguintes condições:

- diâmetro da esfera: $D = 2.5$ mm;
- carga: 15.625 kgf.

AÇO 1020

ESPESSURA [mm]	σ esc. [MPa]	HRb (média)
1.2	265	67
1.5	252	60
1.9	255	57
2.6	281	75
3.0	313	73
3.4	361	74
4.1	250	69
4.7	310	79
6.3	215	69

AÇO INOXIDÁVEL

Espessura [mm]	HRb (média).
2.0	89

COMPOSIÇÃO QUÍMICA PROVÁVEL :

AÇO	C %	Mn %	Si %	P %	S %
1020	0.2	0.45	0.15	0.04	0.5

AÇO	Cr %	Ni %	Mn %	Si %	C %	P %
INÓX - 301	18	7	2	1	0.15	0.045

ALU- MÍNIO	Al %	Fe %	Si %	Mg %	Mn %	Cu %
	99.5	0.4	0.25	0.05	0.05	0.05

COBRE ELETROLÍTICO	Cu %	Ni %	Zn %
	99.0	0.8	0.2

APÊNDICE C

TABELAS PARA ANÁLISE DE DADOS

CHAPA 3,0 mm

AVANÇO f(mm/rot)	ROTAÇÃO (RPM)														
	1960			1570			1250			990			790		
	F1(N)	t(s)	d(mm)	F1(N)	t(s)	d(mm)	F1(N)	t(s)	d(mm)	F1(N)	t(s)	d(mm)	F1(N)	t(s)	d(mm)
0,047	4688	1,43	2,20	6671	1,85	2,28	6674	2,38	2,31	6337	2,48	1,92	5824	3,59	2,22
0,063	5594	1,22	2,51	6844	1,56	2,57	6778	1,70	2,35	6474	2,00	2,08	5997	2,85	2,36
0,094	5517	0,83	2,55	6711	1,13	2,78	6842	1,31	2,57	6475	1,86	2,42	6138	2,17	2,69
0,125	5792	0,79	3,23	6359	0,90	2,94	6888	1,16	3,02	6420	1,39	2,87	5928	1,76	2,90
0,167	5852	0,80	3,67	6111	0,42	2,06	7151	0,89	3,47	6122	0,72	2,22	6202	1,30	3,20
0,250	6119	0,52	4,25	6282	0,31	2,03	7140	0,70	3,85	6225	0,77	3,18	6317	1,08	3,56

AVANÇO f(mm/rot)	ROTAÇÃO (RPM)														
	1960			1570			1250			990			790		
	F2(N)	t(s)	d(mm)	F2(N)	t(s)	d(mm)	F2(N)	t(s)	d(mm)	F2(N)	t(s)	d(mm)	F2(N)	t(s)	d(mm)
0,047	47,77	15,46	23,74	66,84	19,21	23,63	72,31	24,67	24,06	79,41	31,09	24,11	56,81	38,98	24,12
0,063	49,71	11,89	24,06	68,43	14,57	24,02	68,43	18,57	24,37	61,33	23,46	24,39	36,80	30,80	25,55
0,094	39,38	7,97	24,47	64,56	9,85	24,23	65,21	12,49	24,46	41,96	15,84	24,57	32,28	20,42	25,27
0,125	30,99	6,11	24,95	47,13	7,50	24,53	63,92	9,46	24,64	41,32	11,98	24,71	30,34	15,31	25,20
0,167	22,59	4,22	25,78	25,82	5,10	24,96	41,98	6,44	25,09	21,30	6,21	25,33	10,97	10,57	26,03
0,250	11,62	3,28	26,79	21,95	3,91	25,56	20,01	4,97	25,69	17,43	6,31	26,03	13,55	7,94	26,14

AVANÇO f(mm/rot)	ROTAÇÃO (RPM)														
	1960			1570			1250			990			790		
	Mt(N.cm)	t(s)	d(mm)	Mt(N.cm)	t(s)	d(mm)	Mt(N.cm)	t(s)	d(mm)	Mt(N.cm)	t(s)	d(mm)	Mt(N.cm)	t(s)	d(mm)
0,047	561	9,29	14,26	697	14,12	17,37	771	15,25	14,93	876	20,82	16,15	957	25,78	15,94
0,063	643	7,89	16,24	751	10,70	17,64	822	11,75	15,42	932	16,03	16,66	1008	19,16	15,89
0,094	779	5,16	15,84	870	6,11	15,03	952	8,03	15,73	1077	10,35	16,05	1183	11,46	14,18
0,125	898	4,19	17,11	969	4,65	15,86	1077	6,39	16,64	1201	7,82	16,34	1313	9,23	15,19
0,167	1116	2,72	16,62	1243	3,08	15,12	1344	4,32	16,83	1451	5,31	16,38	1584	6,10	15,02
0,250	1313	2,13	17,40	1383	2,42	15,63	1542	2,84	14,79	1640	4,07	16,79	1640	4,47	14,71

APÊNDICE D

AFERIÇÃO DA FURADEIRA RADIAL

AFERIÇÃO DOS AVANÇOS:

Com a utilização de um relógio comparador com divisão de 0.01mm e um curso de 10mm (Marca MITUTOYO) se fez a aferição do avanço.

Para a realização desta aferição a ponta da árvore da furadeira deverá estar localizada na posição central do curso axial máximo (curso na direção do eixo de furação) com o motor desligado e o avanço a ser aferido engatado. A árvore deve ser zerada manualmente de forma a executar exatamente dez (10) rotações. O deslocamento da árvore durante essas dez (10) rotações (L10) deve ser medido através do relógio comparador. Será considerado como avanço um décimo (1/10) desse deslocamento. A superfície de contato entre a árvore e o apalpador do relógio comparador deve ser suficientemente lisa para não prejudicar a medição.

Não foram realizados ensaios para todos os avanços da máquina ferramenta, pois já se tinham informações de que os mesmos não estavam variando devido ao funcionamento mecânico do sistema.

ROTAÇÃO = 19 min ⁻¹		
Avanço (mm/rot)	Deslocamento L10 - (mm)	L10 / 10 (mm/rot)
0,047	0,47	0,047
0,063	0,63	0,063
0,500	5,00	0,500
2,000	20,00	2,00
Variação máximo permitida = 2%		

CALIBRAÇÃO DAS ROTAÇÕES:

O aparelho utilizado para medir as rotações foi uma luz estroboscópica (Marca STROBOTAC 1531) referenciada no apêndice A.

Essa luz deve ser colocada de modo a incidir sobre o fuso da árvore. Neste fuso deve ser feita uma marca para identificar a incidência da luz. A rotação a ser aferida deve estar engrenada. A luz e a furadeira são ligadas, quando o fuso e a luz estiverem à mesma frequência (a luz pisca a cada rotação do fuso) a marca dará a impressão de estar parada e o valor indicado no medidor da luz é a rotação real. Caso isso não ocorra a frequência da luz deve ser ajustada.

Deve-se utilizar o rotação nominal a ser calibrada como leitura inicial no medidor da luz para evitar fenômenos como a luz piscar a cada duas rotações do fuso.

Os ensaios realizados mostraram os seguintes resultados :

ROTAÇÃO NOMINAL (min ⁻¹)	1ª medição	2ª medição	3ª medição	Média aritmética	ES	DM(95)	S
118	125	124	124	124,33	6,33	± 2,49	0,58
150	155	155	155	155,00	5,00	0,00	0,00
190	196	196	196	196,00	6,00	0,00	0,00
236	236	245	245	242,00	6,00	± 22,31	0,00
300	315	314	314	314,33	14,33	± 2,49	0,58
375	395	396	395	395,33	20,33	± 2,49	0,58
475	496	496	496	496,00	21,00	0,00	0,00
600	622	622	622	622,00	22,00	0,00	0,00
750	796	790	790	792,00	42,00	± 14,88	3,46
950	995	990	990	991,67	41,67	± 12,42	2,89
1180	1260	1255	1250	1255,00	75,00	± 21,50	5,00
1500	1580	1575	1570	1575,00	75,00	± 21,50	5,00
1900	1970	1965	1962	1965,67	65,67	± 17,37	4,04

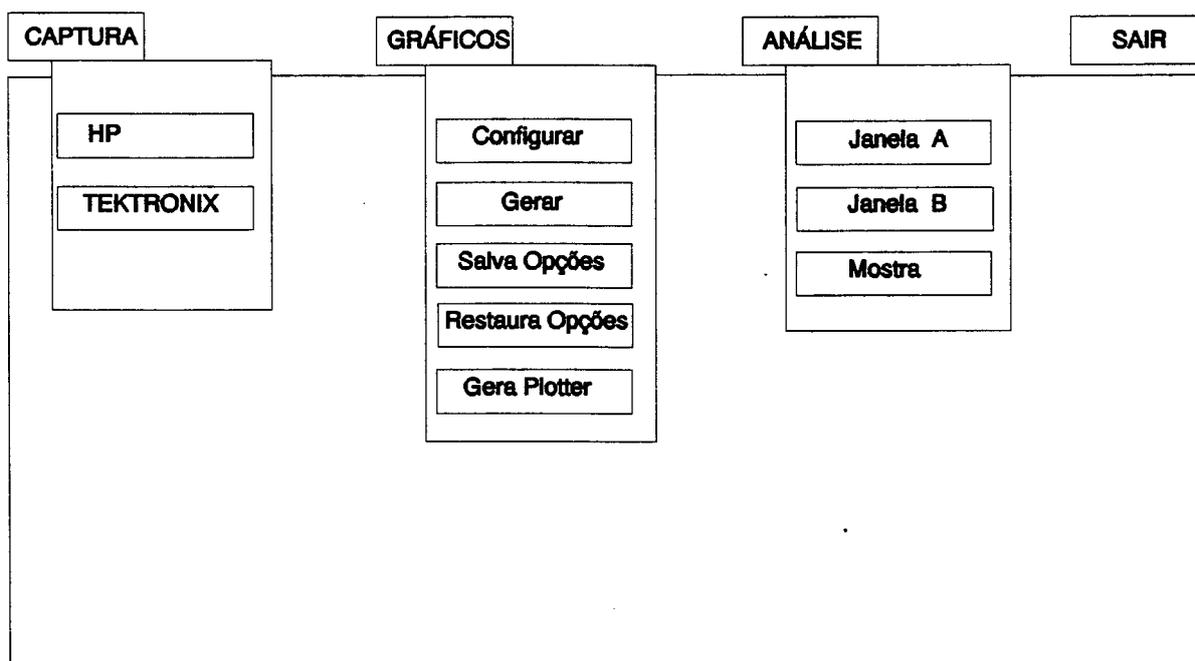
APÊNDICE E

PROGRAMA DE AQUISIÇÕES DE DADOS

SADA - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O software SADA (SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS) foi especialmente desenvolvido para a aquisição, tratamento matemático e plotagem de gráficos gerados com os dados obtidos a partir dos experimentos realizados.

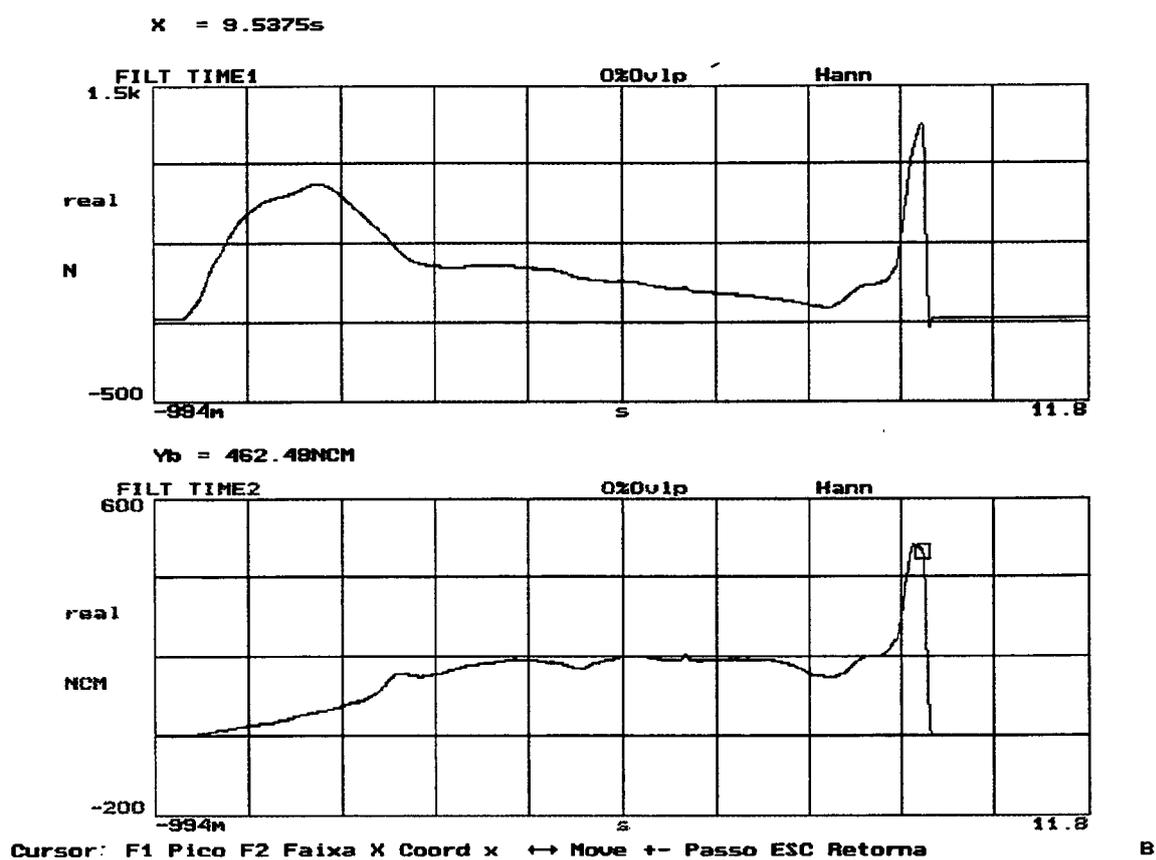
Ele possui uma tela de apresentação onde encontrasse os menus principais de trabalho (figura abaixo) : CAPTURA, GRÁFICOS, ANÁLISE E SAIR



SADA - Sistema de aquisição de dados

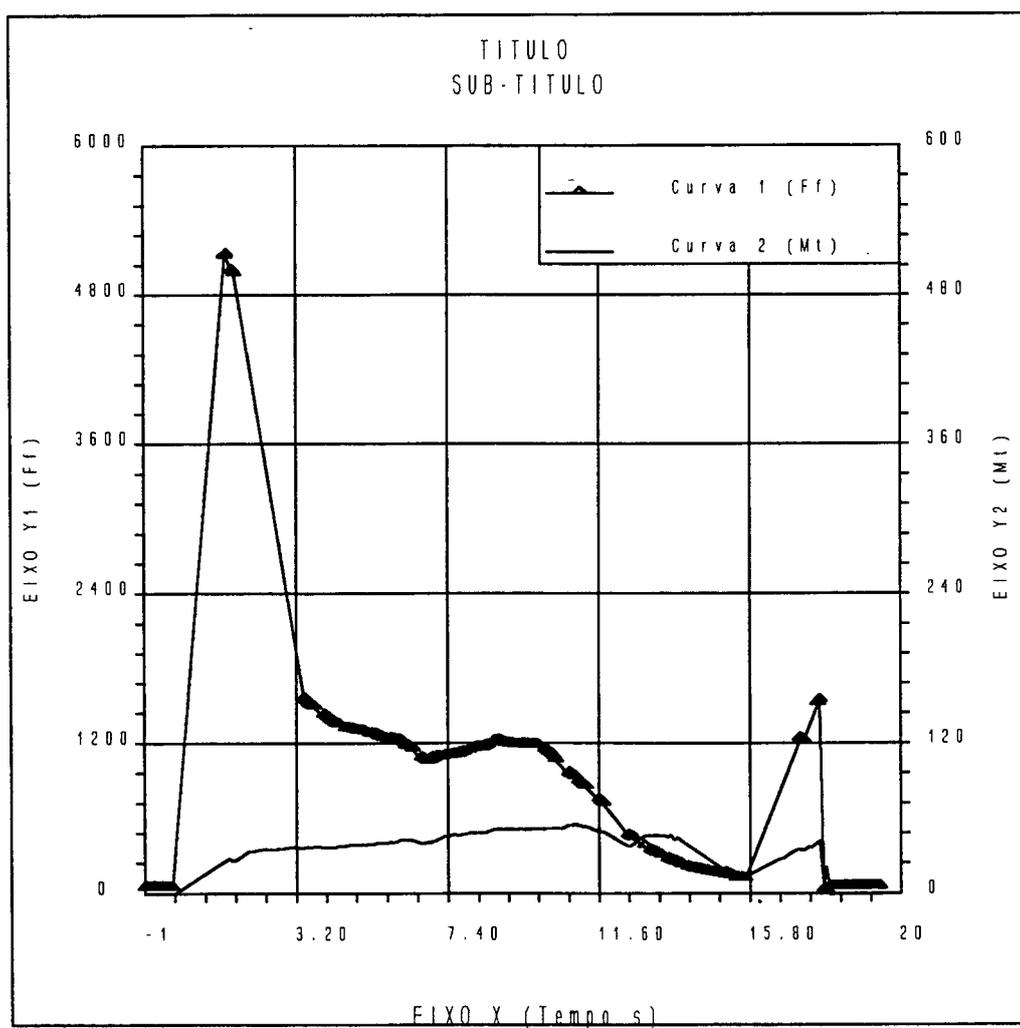
A opção CAPTURA é usada para aquisição de dados e possibilita escolher entre vários equipamentos de coleta de dados.

A opção ANÁLISE possibilita o tratamento de dados de processo capturados. O programa possibilita a análise de 2 canais simultaneamente. Esta análise permite a procura de pontos de máximo, mínimo ou até mesmo média para uma determinada faixa do gráfico. Existe a possibilidade de alteração dos valores das escalas em x e y do gráfico.



Análise de dados - SADA

O submenu GRÁFICOS faz a interface entre o SADA e softwares de processamento de textos, como o Wordperfect 5.1, facilitando desta forma a editoração de trabalhos. Este submenu gera e configura gráficos dando opções de colocação de títulos, subtítulos, legendas, nomes dos eixos e também a geração de arquivos para plotagem.



Produção de Gráficos - SADA

O último submenu, SAIR, serve para abandonar o programa após a realização dos trabalhos desejados.

ERRATA

Em todos os trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Mecânica de Precisão do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC e anteriores a este, o momento torçor era expresso em N.cm.

Este trabalho também seguiu este padrão e sabe-se que utilizando o Sistema Internacional de medidas, as grandezas de momento torçor deveriam ser expressas em N.m.

Fica aqui o alerta para os próximos trabalhos e uma justificativa pelos dados encontrados expressos de maneira falha neste trabalho.

O autor