

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

**ESTUDO MICROESTRUTURAL E DE CAPACIDADE DE CARGA NA
FURAÇÃO POR ESCOAMENTO COM CONDIÇÕES DE
TRABALHO VARIÁVEIS EM PROCESSO**

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

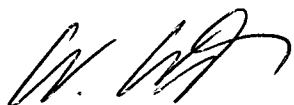
OTACÍLIO CARDOSO DUARTE FILHO

FLORIANÓPOLIS, FEVEREIRO DE 1998

**ESTUDO MICROESTRUTURAL E DE CAPACIDADE DE CARGA NA
FURAÇÃO POR ESCOAMENTO COM CONDIÇÕES DE
TRABALHO VARIÁVEIS EM PROCESSO**

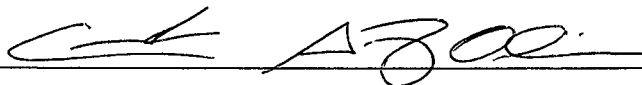
OTACÍLIO CARDOSO DUARTE FILHO

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



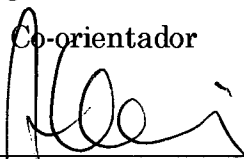
Prof. Dr.-Ing. Walter L. Weingaertner

Orientador



Prof. Carlos Augusto Silva de Oliveira, D.Sc.

Co-orientador



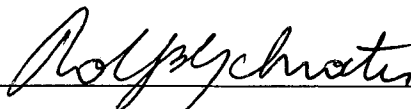
Prof. Abelardo Alves de Queiroz, Ph.D.

Coordenador da Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Carlos Augusto Silva de Oliveira, D.Sc.



Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.



Prof. Pedro Amedeo Nannetti Bernardini, Dr. Eng.

Aos meus pais
Lucinda e Otacílio,
(In memoriam)
e à Denise,
pelo amor e apoio.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner, coordenador do Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) e orientador deste trabalho, pela confiança, apoio e incentivo profissional desde os primeiros trabalhos no LMP.

Ao Prof. D.Sc. Carlos Augusto Silva de Oliveira, pela orientação e pela bagagem de conhecimentos transmitidos.

Ao Prof. Dr.-Ing. Franz Tikal, da GhK Kassel, pela oportunidade das experiências internacionais em seu instituto e pelo apoio material e logístico colocados à disposição.

À CAPES - Programa CNPq RHAE – Engenharia Industrial e de Precisão, pela concessão de bolsas de estudos.

Ao programa de pesquisa Brasil/Alemanha (PROBRAL), pelo apoio nas pesquisas conjuntas entre o IPL e LMP, que viabilizaram a conclusão deste trabalho.

À empresa Flowdrill® B.V. pela doação de ferramentas e equipamentos diversos que contribuíram para a realização deste trabalho.

À Companhia Siderúrgica Paulista (COSIPA), pela doação do material utilizado nos ensaios e pelo envio da análise química.

Ao amigo M.Sc. João Carlos Oliveira Lopes, pelo apoio e confiança nestes anos de trabalho conjunto, e pela experiência de vida profissional e pessoal transmitida.

Ao amigo Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter, pelo exemplo de competência profissional e dedicação, e também pelo auxílio na revisão do trabalho final.

A todo o pessoal do grupo FURPREC, eng. Daniel Carlos da Silva, eng. Haroldo Osis, eng. Marco Aurélio de Alexandria Cruz, e aos bolsistas de iniciação científica Gerson Ismael de Souza, Manfred Molz e Cristiano Rafael Schramm, pela amizade, conselhos e apoio nesta longa jornada de trabalho em grupo. Aos graduandos Gustavo Moretti Zanin e Ercio Massirer Junior pelo apoio nos experimentos e pelo interesse demonstrado.

Aos engenheiros pesquisadores e colaboradores do Institut für Produktionstechnik und Logistik da Universität Gesamthochschule Kassel, Prof. Dr.-Ing. Paucksch, Roland Heiler, Christian Vollmer, Beatrix Hüllsmann, Dr. Wolfgang Scherm, Lothar Helk, Andrea Noll, Hans Siefehrt, Ulrich Pecher, Markus Schmier e Heiner Trinter pelo apoio indispensável e exemplos de seriedade no trabalho, competência e companheirismo demonstrado na estadia na Alemanha. Aos pesquisadores do Institut für Werkstoffkunde, Herrn Bierwind e Dieder Deyseroth pelo auxílio nos ensaios de resistência a tração e medição de microdureza.

Aos colegas do LABMAT, Rubens Maribondo do Nascimento, Júnior Gervásio Justino, Adriano Moreno, Paulo César Borges, Ivens Wagner de Abreu Jr., Sidnei Schmidt e Cristiano Binder, pelas valiosas sugestões e orientação técnica na realização da análise metalográfica.

Aos graduandos Pablo Steffen Morais, Rodrigo Perito Cardoso e Marcus Túlio B. Bressan, pelo trabalho de microscopia eletrônica de varredura.

À Prof^a Ana Maria Maliska e ao graduando Henrique César Pavanatti, pelo suporte técnico na análise de imagens.

Ao Prof. Pedro Amedeo Nannetti Bernardini, pela orientação e conselhos no início do trabalho prático, que deram origem à técnica do material recozido.

Ao doutorando Moacir Eckhardt, pelas discussões e auxílio no fechamento do trabalho.

Ao mestre Ivan da Costa Pereira Filho, pela concepção do software de conversão de dados.

Ao pessoal do Laboratório de Hardware, pelo apoio na utilização de equipamentos de aquisição de sinais.

Ao grupo de pesquisadores do LMPT, graduando Roberto Gaiser pelo auxílio computacional, ao M.Sc. Aldomar Pedrini e aos professores José Antônio Bellini da Cunha Neto e Saulo Güths, pelas sugestões e apoio material e técnico na execução dos ensaios de medição de temperatura.

Ao graduando Edson do LABSOLAR, pelo auxílio na soldagem dos termopares.

Às secretárias do LMP, Rosimar Maria Franzoi, Sílvia Alice de Faria Zomer e às biblioteconomistas Vera Lúcia Quadro Duarte e Geresa Quadro Duarte.

Ao coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Abelardo Alves de Queiroz (1996/1997).

À minha família, em especial às minhas irmãs Dagmar e Susana, pelo incentivo e apoio.

Aos professores do curso, colegas e todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A furação por escoamento trata da execução de buchas em chapas finas sem a remoção de cavacos, através da atuação de uma ferramenta rotativa que promove o aquecimento do material e a sua conformação. Através do rosqueamento por conformação esta bucha pode ser roscada resultando numa fixação removível.

Neste trabalho desenvolve-se a análise da influência da alteração da velocidade e da rotação nas variáveis “*in-process*”, como força de avanço e momento torçor, potência, trabalho de conformação e temperatura da bucha, bem como nos resultados de trabalho, como qualidade e geometria da bucha e resistência à tração da bucha roscada.

O estudo das transformações microestruturais do material da peça, decorrentes do trabalho termomecânico inerente à furação por escoamento, é enfatizado neste trabalho. Nesta análise metalográfica são utilizadas técnicas de microscopia óptica, de microscopia eletrônica de varredura e de medição de microdureza, que complementadas pela medição de temperatura, trazem informações relativas à resistência mecânica da região deformada da bucha escoada. Os fenômenos de refino de grão e recristalização são particularmente analisados.

Ao final procura-se correlacionar as transformações microestruturais e alterações na geometria da bucha, geradas pelas condições de trabalho variáveis em processo, com os resultados de resistência à tração da bucha roscada. Nesta última etapa também foram testadas as classes de resistência das buchas roscadas, segundo a norma DIN 267/4, o que serve como indicativo de projeto para fixações roscadas.

ABSTRACT

The flowdrilling process deals with producing bushes on thin metal sheets without removing chips. A rotary tool is used producing the material heating and its conformation. These bushes can be chipless tapped on a cold conformation process resulting in a removable fixation.

Through this research, a way of analysis was developed for the speed and rotation influence in-process variables, such as axial force and moment, power, conformation work, and bush temperature. Studied from the results were quality and bush geometry and also the tapped bush pull-out resistance.

An emphasis was given to the workpiece microstructural transformations study resulting from thermodynamic work inherent to the flowdrilling process. Techniques used in this metalographic analysis were optical microscopy, scanning electron microscopy and microhardness techniques, which were complemented with a temperature measurement, giving information relative to the mechanics resistance of the bush's deformed region. The grain refinement and recrystallization phenomena were particularly analysed.

Finally, an attempt was made to correlate the microstructural transformations and bush geometry alterations, caused by the variables work conditions in-process with the tapped bush pull-out resistance. In this last stage, the tapped bushes resistance was also tested accordingly to the standard DIN 267/4 that served as an indicator to tapped unions.

ZUSAMMENFASSUNG

Das Fließlochformen ist ein spanloses Fertigungsverfahren zum Erzeugen von Durchzügen in dünnwandigen Blechen und Bauteilen. Ein rotierender Hartmetalldorn wird mit hoher Drehzahl auf ein Werkstück aufgesetzt, wobei die Reibung und Deformation Wärmeenergie erzeugen. Dadurch wird das Material in eine Buchse verformt. In einem weiteren Vorgang wird in die Buchse ein Gewinde gefurcht, welches zu einer Schraubverbindung genutzt werden kann.

In dieser Arbeit wird die Analyse des Einflusses der gestuften Technologieparameter beim Fließlochformen auf die Prozesskenngrößen Axialkraft, Drehmoment, Leistung, Umformungsarbeit und Temperatur durchgeführt. Auch der Einfluß auf die Arbeitsergebnisse, Buchsenqualität und -geometrie und Zugfestigkeit der Schraubverbindung, wird ermittelt.

Die durch die Thermo-Umformungsarbeit in der Umformungszone entstandenen Gefügeveränderungen werden in dieser Arbeit intensiv untersucht. Bei der metallographischen Analyse kamen optische und Rasterelektronen-Mikroskopie und Mikrohärtevermessung zum Einsatz, die zusammen mit der Temperatur die Erfassung wichtiger Informationen im Umformungsbereich ermöglichen. Die Kornverfeinerung und die Rekristalitzation werden hier besonders hervorgehoben.

Zum Schluß wird der Zusammenhang zwischen Gefügeveränderungen, Geometrie und Zugfestigkeit erforscht. Dabei werden auch die Festigkeitsklassen der Gewinden nach DIN 267 Teil 4 ermittelt, die als Konstruktionweisen benutzt werden können.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	1
2 ESTADO DA ARTE	3
2.1 Histórico da Furação por Escoamento	3
2.2 O Princípio da Furação por Escoamento.....	4
2.3 Aplicações da Furação por Escoamento	5
2.3.1 Uniões em chapas finas	5
2.3.2 Estruturas metálicas da construção civil	6
2.3.3 Tubos e vasos de pressão	7
2.4 Características da Furação por Escoamento como Processo	7
2.5 Grandezas de Entrada.....	8
2.5.1 Sistema.....	8
2.5.2 Parâmetros de entrada	13
2.6 Grandezas de Processo	14
2.6.1 Força de avanço (F_f) e momento torçor (M_t)	14
2.6.2 Cinemática da furação por escoamento	16
2.6.3 Potência mínima requerida para a conformação da bucha.....	19
2.6.4 Trabalho de translação (W_T) e rotação (W_R).....	20
2.6.5 Temperatura da bucha	23
2.6.6 Duração do processo.....	27
2.7 Resultados de Trabalho.....	27
2.7.1 Forma e dimensões da bucha.....	28
2.7.2 Qualidade das rebarbas inferiores.....	29
2.7.3 Resistência à tração da fixação roscada	30
2.8 Aspectos Metalúrgicos na Furação por Escoamento.....	32
2.8.1 Conformabilidade de aços de baixo carbono.....	32
2.8.2 O bandeamento em chapas laminadas.....	33
2.8.3 Recuperação, recristalização e crescimento de grão	34
2.8.4 Refino de grão durante a conformação mecânica	37
2.8.5 Fator de forma	39
2.8.6 Taxa de deformação	40
2.8.7 Microdureza	42
2.8.8 Técnica do material recozido.....	43

2.9 Rosqueamento por Conformação.....	45
3 OBJETIVOS DO TRABALHO	47
4 METODOLOGIA DE ENSAIO	48
5 MÉTODO EXPERIMENTAL.....	50
6 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	52
6.1 Condições de Ensaio	52
6.2 Ferramentas	52
6.3 Lubrificante	53
6.4 Infraestrutura de Ensaios.....	53
6.4.1 Ensaios para medição de Ff e Mt.....	53
6.4.2 Ensaios para medição de temperatura.....	55
6.5 Medição das Dimensões Principais e Avaliação da Qualidade da Rebarba.....	58
6.6 Análise Metalográfica.....	58
6.6.1 Preparação de amostras.....	58
6.6.2 Técnica do material recozido.....	58
6.6.3 Microscopia óptica.....	59
6.6.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).	59
6.7 Medição de Microdureza Vickers HV 0,1	59
6.8 Ensaios de Resistência à Tração	60
7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	62
7.1 Força de Avanço (Ff) e Momento Torçor (Mt)	62
7.1.1 Amostras com v_f constante	62
7.1.2 Amostras com v_f variável.....	64
7.1.3 Amostra com rotação e v_f variáveis	66
7.2 Trabalho de Conformação	67
7.3 Medição de Temperatura	68
7.3.1 Amostras com v_f constante	68
7.3.2 Amostras com v_f variável.....	70
7.3.3 Amostra com rotação e v_f variáveis	72
7.4 Geometria e Qualidade da Bucha Escoada.....	73
7.5 Tempo de Processo e Intensidade de Deformação	74
7.6 Análise Microestrutural	76
7.6.1 Microscopia óptica.....	76

7.6.2	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	83
7.6.3	Análise pela técnica do material recozido	92
7.6.4	Medição de microdureza HV 0,1	98
7.7	Resistência à Tração.....	103
7.7.1	Ensaio de resistência à tração.....	104
7.7.2	Ensaio de classes de resistência.....	108
8	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	110
8.1	Força de Avanço, Momento Torçor e Potência	110
8.2	Trabalho de Conformação	111
8.3	Temperatura da Bucha	111
8.4	Geometria e Qualidade das Buchas	113
8.5	Análise Microestrutural	114
8.5.1	Caracterização microestrutural das amostras 10300 e 10600.....	114
8.5.2	Caracterização microestrutural das amostras com v_f variável.....	116
8.5.3	Técnica do material recozido.....	118
8.5.4	Microdureza HV 0,1	118
8.6	Resistência à Tração.....	120
9	CONCLUSÕES.....	122
10	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	125
11	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	126
12	ANEXOS	131
12.1	Máquina-ferramenta	131
12.2	Plataforma Piezelétrica	132
12.3	Sistema de Aquisição e Tratamento de Dados.....	132
12.4	Material Aço SAE 1012	133
12.5	Sistema de Aquisição de Dados de Temperatura	134
12.6	Dispositivo de Fixação – Ensaio de Medição de Temperatura.....	135
12.7	Microscópio Universal Leitz-Strasman.....	135
12.8	Programa Analisador de Imagens <i>analySIS</i>	136
12.9	Cálculo de Integração no Programa Microsoft Excel®	137
12.10	Tratamento Estatístico.....	137
12.11	Máquina de Tração Universal Zwick 1484	138
12.12	Ensaio de Classes de Resistência - Procedimentos da Norma DIN 267/4	139

LISTA DE FIGURAS

	Página
FIGURA 1 - Esquema do princípio do processo segundo norma VDI 3359 [4]	4
FIGURA 2 - Comparação entre tecnologias de fixação em chapas finas [8,9]	6
FIGURA 3 - Estrutura metálica fixada com buchas roscadas [11]	6
FIGURA 4 - Peça de escapamento de automóvel [12]	7
FIGURA 5 - Geometria da ferramenta de furação por escoamento [3]	9
FIGURA 6 - Tipos de ferramenta de furação por escoamento [17]	10
FIGURA 7 - Cores rubras durante o processo de furação por escoamento	11
FIGURA 8 - Aplicação do lubrificante na ferramenta	12
FIGURA 9 - Mandris aletados especiais para a furação por escoamento, do fabricante Zecha [19].....	12
FIGURA 10 - Variáveis de entrada (condições de trabalho) rotação (n) e velocidade de avanço (v_f) em máquinas CNC.....	13
FIGURA 11 - Esforços atuantes na ferramenta durante a furação por escoamento	15
FIGURA 12 - Furação por escoamento com força de avanço aplicada constante [3]	17
FIGURA 13 - Fases da furação por escoamento [14]	18
FIGURA 14 - Trabalho de rotação W_R	21
FIGURA 15 - Trabalho de translação W_T	22
FIGURA 16 - Medição de temperatura com pirômetro [3]	24
FIGURA 17 - Medição de temperatura através de termopares [20]	24
FIGURA 18 - Fixação de termopares na região de deformação [2]	26
FIGURA 19 - Temperaturas na região de deformação [2].....	26
FIGURA 20 - Dimensões principais da bucha escoada [3]	28
FIGURA 21 - Qualidade das rebarbas inferiores, segundo Heiler [14].....	29
FIGURA 22 - Dispositivo do ensaio de tração, segundo DIN 267/4 [9]	31
FIGURA 23 - Micrografia de aço recozido (0,12% C).....	34
FIGURA 24 - Evolução do arranjo da microestrutura durante a recristalização [28]	35
FIGURA 25 - Processos de recristalização estática e dinâmica na extrusão a quente [28]..	36
FIGURA 26 - Representação esquemática do mecanismo de refino de grão na conformação a morno. K_A = tamanho de grão inicial. K_E = tamanho de grão final [30].....	38
FIGURA 27 - Comparação entre diferentes taxas de deformação	41
FIGURA 28 - Medições de microdureza na região da borda da bucha [1]	42
FIGURA 29 - Micrografia de bucha com v_f constante de 100 mm/min	44

FIGURA 30 - Formação dos filetes no rosqueamento por conformação [3].....	45
FIGURA 31 - Macho de conformação, segundo o fabricante Zecha [19]	46
FIGURA 32 - Fluxograma do desenvolvimento do trabalho	49
FIGURA 33 - Representação esquemática da bancada de ensaios para a medição de força de avanço e momento torçor	54
FIGURA 34 - Geometria dos corpos de prova.....	54
FIGURA 35 - Esquema de montagem do dispositivo de fixação [36]	55
FIGURA 36 - Bancada de equipamentos para medição de temperatura	56
FIGURA 37 - Geometria dos corpos de prova para a medição de temperatura.....	56
FIGURA 38 - Detalhe da fixação dos termopares no corpo de prova	57
FIGURA 39 - Distribuição dos pontos de medição de microdureza Vickers HV 0,1	60
FIGURA 40 - Curvas de força de avanço e momento torçor da amostra 10300.....	63
FIGURA 41 - Curvas de força de avanço e momento torçor da amostra 10600.....	63
FIGURA 42 - Curvas de força de avanço e momento torçor da amostra vf1.....	65
FIGURA 43 - Curvas de força de avanço e momento torçor da amostra vf2.....	65
FIGURA 44 - Curvas de força de avanço e momento torçor da amostra vf3.....	66
FIGURA 45 - Curva de temperatura e gradiente de temperatura para a amostra 10300...	69
FIGURA 46 - Curva de temperatura e gradiente de temperatura para a amostra 10600...	69
FIGURA 47 - Curva de temperatura e gradiente de temperatura para a amostra vf1.....	70
FIGURA 48 - Curva de temperatura e gradiente de temperatura para a amostra vf2.....	71
FIGURA 49 - Curva de temperatura e gradiente de temperatura para a amostra vf3.....	72
FIGURA 50 - Micrografias da amostra 10300	77
FIGURA 51 - Micrografias da amostra 10600	78
FIGURA 52 - Micrografias da amostra vf1.....	80
FIGURA 53 - Micrografias da amostra vf2.....	81
FIGURA 54 - Micrografias da amostra vf3.....	82
FIGURA 55 - Micrografia (MEV) do material base da amostra vf3.....	84
FIGURA 56 - Classificação e distribuição das variáveis s, d e a do material base	84
FIGURA 57 - Micrografia (MEV) da região deformada da amostra 10300.....	85
FIGURA 58 - Classificação e distribuição das variáveis s, d e a da amostra 10300.....	85
FIGURA 59 - Micrografia (MEV) da região deformada da amostra 10600.....	87
FIGURA 60 - Classificação e distribuição das variáveis s, d e a da amostra 10600.....	87
FIGURA 61 - Micrografia (MEV) da região deformada da amostra vf1	88
FIGURA 62 - Classificação e distribuição das variáveis s, d e a da amostra vf1.....	88

FIGURA 63 - Micrografia (MEV) da região deformada da amostra vf2	90
FIGURA 64 - Classificação e distribuição das variáveis s, d e a da amostra vf2.....	90
FIGURA 65 - Micrografia (MEV) da região deformada da amostra vf3	91
FIGURA 66 - Classificação e distribuição das variáveis s, d e a da amostra vf3.....	91
FIGURA 67 - Micrografia do aço SAE 1012 recozido (900°C - 6 h).	92
FIGURA 68 - Classificação e distribuição das variáveis s, d e a do material recozido	93
FIGURA 69 - Micrografias com material recozido das amostras 10300 e 10600.....	95
FIGURA 70 - Micrografias com material recozido das amostras vf1 e vf2	96
FIGURA 71 - Micrografia com material recozido da amostra vf3.....	97
FIGURA 72 - Medições de microdureza HV 0,1 na amostra 10300.	98
FIGURA 73 - Medições de microdureza HV 0,1 na amostra 10600.	99
FIGURA 74 - Medições de microdureza HV 0,1 na amostra vf1	100
FIGURA 75 - Medições de microdureza HV 0,1 na amostra vf2	101
FIGURA 76 - Medições de microdureza HV 0,1 na amostra vf3.....	102
FIGURA 77 - Estado da bucha roscada antes do ensaio de tração.	103
FIGURA 78 - Estado da bucha roscada após o ensaio de tração.....	103
FIGURA 79 - Curvas de resistência à tração da amostra 10300	104
FIGURA 80 - Curvas de resistência à tração da amostra 10600	105
FIGURA 81 - Curvas de resistência à tração da amostra vf1	106
FIGURA 82 - Curvas de resistência à tração da amostra vf2	106
FIGURA 83 - Curvas de resistência à tração da amostra vf3	107
FIGURA 84 - Valores médios de resistência à tração da amostras analisadas	108
FIGURA 85 - Diagrama de resfriamento contínuo (CCD) para o aço AISI 1010 [40]	116
FIGURA 86 - Mecanismo de refino de grão para as amostras vf1, vf2 e vf3	117
FIGURA 87 - Máquina-ferramenta Romi F400 [38].....	131
FIGURA 88 - Plataforma piezométrica KISTLER 9273 [41]	131
FIGURA 89 - Apresentação dos gráficos de força de avanço e momento torçor no programa SADA.....	133
FIGURA 90 - Área de trabalho do programa <i>BenchLink/Meter</i> [42].....	134
FIGURA 91 - Dimensões do dispositivo de fixação para os ensaios de temperatura [36] ...	135
FIGURA 92 - Microscópio universal de medição com detalhe do visor, com divisão de escala de 1 μm [12]	136
FIGURA 93 - Janela do programa <i>analySIS</i> de análise de imagens [31]	137
FIGURA 94 - Máquina de tração universal Zwick 1484 [1]	138

LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 1 - Principais grandezas e resultados de trabalho da furação por escoamento	8
TABELA 2 - Figuras geométricas e seus respectivos fatores de forma [32].	40
TABELA 3 - Vantagens do rosqueamento por conformação [9].	45
TABELA 4 - Condições de trabalho para as amostras.	52
TABELA 5 - Cargas de teste para a rosca M8, segundo DIN 267/4 [22].	61
TABELA 6 - Valores do trabalho de rotação e translação das amostras.	67
TABELA 7 - Dimensões e qualidade das buchas escoadas.....	73
TABELA 8 - Valores de tempo principal de processo.	74
TABELA 9 - Classes de resistência das amostras analisadas [22].	109
TABELA 10 - Composição química do aço SAE 1012 [43].	134
TABELA 11 - Principais propriedades mecânicas para o aço SAE 1012 [44].	134

SIMBOLOGIA

Letras Maiúsculas

A	[m ²]	Área
D	[mm]	Distância à superfície superior da chapa
F	[N]	Força externa aplicada na ferramenta
F _f	[N]	Força de avanço
F _{f1}	[N]	Força de avanço intermediária de platô
F _{f2}	[N]	Força de avanço mínima
F _{f_{final}}	[N]	Força de avanço do final do furo
F _{f_{máx}}	[N]	Força de avanço máxima
F _K	[N]	Carga de tração na bucha roscada
F _{K Máx}	[N]	Carga máxima de resistência à tração da bucha roscada
F _{K Máx MED}	[N]	Carga máxima média de resistência à tração da bucha roscada
K _A	[μm]	Tamanho de grão inicial
K _E	[μm]	Tamanho de grão final
M _t	[N.m]	Momento torçor
M _{t_{final}}	[N.m]	Momento torçor final
M _{t_{máx}}	[N.m]	Momento torçor máximo
Ø	[mm]	Diâmetro da ferramenta de furação por escoamento
P	[W]	Potência consumida
P	[m]	Perímetro
T _A	[°C]	Temperatura inicial de laminação
T _E	[°C]	Temperatura final de laminação
T _o	[°C]	Temperatura na interface ferramenta-peça
T _i	[°C]	Temperatura no ponto r _i
T _j	[°C]	Temperatura no ponto r _j
T _{Máx MED}	[°C]	Temperatura máxima média
ΔT _{Máx MED}	[°C]	Gradiente de temperatura máximo médio
ΔT _{Mín MED}	[°C]	Gradiente de temperatura mínimo médio
T _R	[°C]	Temperatura de recristalização

W_F	[J]	Trabalho total de conformação
W_R	[J]	Trabalho de rotação
W_T	[J]	Trabalho de translação
X	[mm]	Eixo horizontal da máquina-ferramenta
Y	[mm]	Eixo horizontal da máquina-ferramenta
Z	[mm]	Eixo vertical da máquina-ferramenta

Letras Minúsculas

a	[m]	Lado de um polígono
a	[μm^2]	Área de um grão
b	[m]	Espessura de um polígono
d	[mm]	Diâmetro interno da bucha
d	[mm]	Diâmetro do parafuso de ensaio de tração
d	[μm]	Diâmetro médio de grão
e_p	[mm]	Espessura da parede da bucha
h	[mm]	Espessura da placa do dispositivo segundo DIN 267/4
l	[mm]	Comprimento total da bucha
l_0	[mm]	Comprimento inicial
Δl	[mm]	Variação no comprimento
\ln	-	Logaritmo natural
n	[min^{-1}]	Rotação
n	-	Número de medições
r	[mm]	Distância ao centro do furo
r_0	[mm]	Raio da ferramenta
r_i	[mm]	Distância da posição i ao centro do furo
r_j	[mm]	Distância da posição j ao centro do furo
s	[mm]	Espessura da chapa ou tubo
s	-	Fator de forma
t	[s]	Tempo
t_1	[s]	Tempo inicial
t_2	[s]	Tempo final
Δt	[s]	Intervalo de tempo

v_c	[mm/min]	Velocidade de corte
v_f	[mm/min]	Velocidade de avanço
\bar{x}_n	-	Valor médio de n medições
x_i	-	Inésimo valor x
z	[m]	Deslocamento da ferramenta no eixo vertical Z
z_1	[m]	Deslocamento inicial da ferramenta no eixo Z
z_2	[m]	Deslocamento final da ferramenta no eixo Z

Letras gregas

δ	%	Profundidade de ruptura da rebarba
φ	[rad]	Ângulo de giro
$\dot{\varphi}$	[mm/s]	Velocidade de deformação
φ_1	[rad]	Ângulo de giro inicial
φ_2	[rad]	Ângulo de giro final
$\dot{\varphi}$	[s ⁻¹]	Taxa de deformação
π	-	Constante 3,1415...
σ	[MPa]	Tensão de compressão
σ	-	Desvio-padrão
Σ	-	Somatório
ω	[s ⁻¹]	Velocidade angular da ferramenta

Abreviaturas e símbolos químicos

10300	-	Amostra com rotação e velocidade de avanço constante
10600	-	Amostra com rotação e velocidade de avanço constante
A	-	Austenita
Ac1	-	Temperatura de início de transformação austenítica no aquecimento
Ac3	-	Temperatura final de transformação austenítica no aquecimento
AISI	-	American Iron and Steel Institute

Al ₂ O ₃	-	Óxido de Alumínio (Alumina)
B	-	Bainita
C	-	Carbono
CCD	-	Continuous Cooling Diagram
CNC	-	Computer Numeric Control
COSIPA	-	Companhia Siderúrgica Paulista
Cr	-	Cromo
CSA	-	Control System Analyser
Cu	-	Cobre
DIN	-	Deutsche Industrie Normen
DOS	-	Disk Operational System
EUA	-	Estados Unidos da América
EJOT	-	Parafuso auto-rosqueável
EJOT-FDS	-	Parafuso auto-rosqueável por escoamento
EP	-	Extrema pressão
F	-	Ferrita
FdKS	-	Pasta lubrificante para furação por escoamento
FtMA	-	Óleo de corte para rosqueamento por conformação
GhK	-	Gesamthochschule Kassel (Alemanha)
GmbH	-	Gesellschaft mit beschränkter Haftung (Ltda.)
HB	-	Dureza Brinell
HP	-	Hewlett-Packard
HV	-	Dureza Vickers
HRC	-	Dureza Rockwell C
IBM	-	International Business Machines
IPL	-	Institut für Produktionstechnik und Logistik (Alemanha)
ISO	-	International Standardizing Organisation
LABMAT	-	Laboratório de Materiais - UFSC
LMP	-	Laboratório de Mecânica de Precisão - UFSC
M6	-	Rosca métrica de 6 mm de diâmetro
M8	-	Rosca métrica de 8 mm de diâmetro
MEV	-	Microscopia eletrônica de varredura
Mn	-	Manganês
NiCr	-	Cromo-Níquel

Ni	-	Níquel
Nb	-	Nióbio
P	-	Fósforo
P	-	Perlita
PC	-	Personal Computer
<i>Rem</i>	-	Ferramenta com afiação na ponta (Flowdrill® B.V.)
S	-	Enxofre
S275JOH	-	Aço baixo carbono laminado a quente (norma inglesa)
SADA	-	Sistema de aquisição e tratamento de dados
SAE 1020	-	Aço com 0,2% de carbono (norma SAE)
SAE	-	Society of American Engineers
Si	-	Silício
SiC	-	Carboneto de Silício
Si ₃ N ₄	-	Nitreto de Silício
St	-	Stahl (Aço)
St 37	-	Aço de baixo carbono (norma DIN)
(Ti,Al)N	-	Nitreto de Titânio e Alumínio
UFSC	-	Universidade Federal de Santa Catarina
vf1	-	Amostra com velocidade de avanço variável
vf2	-	Amostra com velocidade de avanço variável
vf3	-	Amostra com rotação e velocidade de avanço variável
VDI	-	Verein Deutscher Ingenieure
ZTA	-	Zona termomecanicamente afetada

1

INTRODUÇÃO

A furação por escoamento é um processo de fabricação de buchas escoadas em chapas finas ou peças de pequena espessura sem a remoção de cavacos. Este processo é particularmente importante na produção de buchas para fixações roscadas nestes tipos de peça, onde geralmente se faz necessário um aumento da área roscada, quando se deseja obter uma fixação mais rígida.

A execução das buchas na furação por escoamento é executada por uma ferramenta de metal duro de geometria especial, que rotacionada a alta velocidade promove o aquecimento do material na região de trabalho, permitindo que o mesmo seja conformado axial e radialmente, através do movimento de translação desta ferramenta. Desta operação resulta uma bucha escoada, a qual pode ser utilizada como ponto de brasagem ou roscada, servindo então como ponto de união para uma fixação com parafuso. As fixações roscadas compostas de buchas, produzidas através da furação por escoamento, constituem uma alternativa às soluções convencionais utilizadas em peças de pequena espessura, como o uso de rebites ou porcas insertadas. A grande vantagem da substituição destes elementos de união tradicionais por buchas roscadas refere-se à capacidade de carga, comprovadamente mais elevada quando se utiliza a tecnologia de furação por escoamento.

O emprego de condições de trabalho variáveis na furação por escoamento pode trazer muitas vantagens em relação aos resultados obtidos com a seleção de parâmetros de entrada usual, onde rotação e velocidade de avanço são mantidos constantes em processo. A aceleração da velocidade de avanço promove uma redução drástica do tempo principal de processo, além de melhorar a forma da bucha escoada, o que permite a obtenção de buchas roscadas de resistência à tração mais elevada.

A isto deve ser adicionado o fato da presença crescente de máquinas-ferramentas CNC na indústria, que é fator essencial para utilização da furação por escoamento com condições de trabalho variáveis em processo.

Por tratar-se de um processo de conformação a temperaturas relativamente altas (600-800°C), o estudo metalúrgico da furação por escoamento possui importância significativa. Entretanto, as transformações microestruturais decorrentes do processo ainda não foram investigadas a fundo.

Neste trabalho realizou-se uma análise comparativa entre o uso de condições de trabalho constantes em processo com a utilização de condições de trabalho variáveis, com base nas variáveis de processo e resultados de trabalho. O objetivo final desta análise foi avaliar a capacidade de carga das buchas roscadas com condições de trabalho variáveis.

Paralelamente foi desenvolvido um estudo metalúrgico do processo, com o objetivo de diminuir a lacuna de informações sobre as transformações microestruturais que ocorrem na bucha escoada. Neste estudo procurou-se desenvolver e validar novas técnicas de análise microestrutural, necessárias à compreensão dos fenômenos metalúrgicos inerentes ao processo.

Neste trabalho é utilizada uma fresadora CNC, onde é desenvolvido o estudo em aço SAE 1012, com uma ferramenta 7,3 mm de diâmetro, que produz o pré-furo para uma rosca M8.

Inicialmente na revisão bibliográfica são abordados os aspectos relativos às variáveis de processo, com base em vários trabalhos. A seguir é desenvolvida a parte relacionada às transformações microestruturais, onde é dada ênfase aos fenômenos de recristalização e refino de grão.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Histórico da Furação por Escoamento

A primeira tentativa de produzir furos em chapas finas de aço sem a retirada de cavacos, aproveitando-se do calor gerado pelo contato com a peça de uma ferramenta giratória, foi realizada em 1923 pelo francês Claude de Valliere. Em função da falta de um material mais adequado para a ferramenta, como por exemplo o metal duro - que foi introduzido na fabricação somente em 1927 - esta apresentava uma vida extremamente baixa. Na época, além de não se dispor da tecnologia de fabricação da ferramenta não se conhecia exatamente a sua geometria. Nos anos 20 este processo também era conhecido nos EUA, entretanto não existem registros sobre aplicações [1].

Mais tarde, em 1957, outro francês, Armand Leroy, registrou uma patente com o título “Processo e ferramentas para a fabricação de buchas e as buchas resultantes deste processo”, sem entretanto mencionar aplicações práticas. Na década de 60 foi apresentada a primeira aplicação industrial da furação por escoamento de que se tem notícia, desenvolvida pelo holandês J. van Geffen, que denominou o processo de *vloei-borens*. De 1972 a 1977 van Geffen desenvolveu outros tipos de ferramentas que obtiveram sucesso em aplicações práticas. A partir destas ferramentas foram registradas várias patentes holandesas até o final da década de 70. Nessa época surgiram outros casos de aplicação na Holanda e na Inglaterra [2].

A partir do início da década de 70 iniciaram-se as primeiras pesquisas acadêmicas sobre furação por escoamento na Universidade de Siegen, Alemanha, no sentido de encontrar fundamentos tecnológicos para a aplicação do processo em outros materiais. Em 1980 o prof. Kretschmer, desta mesma universidade, defendeu a tese de doutorado com o título “Furação por escoamento” [3].

Na década de 80 as linhas de pesquisa se difundiram para outras instituições, como a Universidade Tecnológica de Twente, Holanda, sob a orientação do Prof. H. J. J. Kals, na Universidade Integrada de Kassel, Alemanha, sob a orientação do Prof. Franz Tikal, e também pela empresa *British Steel Tubes and Pipes*. No Brasil, pesquisas nesta área foram iniciadas em 1991 no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) do Departamento de

Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, sob a orientação do Prof. Walter L. Weingaertner, através de contatos com a empresa Flowdrill® B.V. Os desenvolvimentos nesta área levaram ao convênio internacional de pesquisa com o Instituto para Técnicas de Produção e Logística (IPL) da Universidade Integrada de Kassel.

2.2 O Princípio da Furação por Escoamento

Segundo a norma VDI 3359 [4], de 1986, o processo de furação por escoamento é aquele em que uma ferramenta cilíndrica, de metal duro e de ponta cônica, é rotacionada e pressionada com uma força F contra a peça, como mostrado na figura 1. Através da rotação n é gerado atrito entre a ferramenta e a peça, que produz o calor necessário para diminuir a resistência do material e aumentar a sua plasticidade, facilitando a sua conformação.

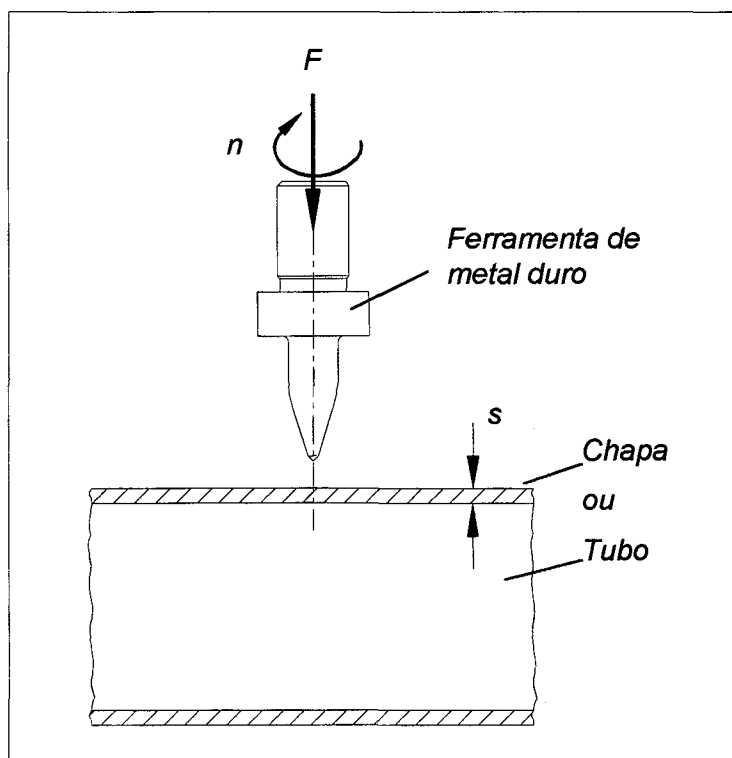


FIGURA 1 - Esquema do princípio do processo segundo norma VDI 3359 [4].

Estudos mais recentes [5] citam que a maior parcela de geração de calor se deve às deformações localizadas, promovidas pela passagem dos lóbulos da ferramenta, quando em

contato com a peça, e não ao atrito dinâmico entre as superfícies da ferramenta e da peça. Estes fatores combinados geram o calor necessário para aumentar a plasticidade do material, escoando-o nas direções axial e radial, sendo então conformado numa bucha.

König [6] define os processos de furação como aqueles que possuem um movimento rotativo principal, onde a ferramenta apresenta apenas um movimento de avanço, na direção do eixo de rotação. Deste modo, a furação por escoamento pode ser classificada como um processo de furação. Entretanto, por não haver remoção de cavacos não pode ser considerado como um processo de usinagem, e sim um processo de conformação.

2.3

Aplicações da Furação por Escoamento

A seguir são apresentados alguns tipos de uniões e fixações removíveis utilizadas em chapas finas ou peças de pequena espessura, onde a furação por escoamento encontra aplicação. Entende-se como removível a fixação que pode ser desmontada sem que as peças que a compõem sejam inutilizadas.

As soluções convencionais para a fixação de peças de pequena espessura normalmente requerem várias etapas de fabricação, além do uso de máquinas-ferramentas especiais, que tornam a sua produção complexa. Alguns problemas comuns destas soluções incluem a capacidade de vedação insuficiente, quando tais sistemas são aplicados em vasos de pressão e a quebra devido à fadiga, na presença de solicitações dinâmicas. Além disso, na maioria dos casos, há remoção de material e adição de elementos externos na peça [7].

2.3.1

Uniões em chapas finas

A produção de uniões em chapas finas, como ilustrado na figura 2, requer quase sempre a utilização de elementos adicionais, como rebites e porcas, ou a utilização do puncionamento, a fim de aumentar a área roscada disponível para uma fixação.

Isto é necessário em uniões onde o comprimento roscado disponível é geralmente de resistência insuficiente às cargas em trabalho. Buchas roscadas podem ser aplicadas na maioria dos casos, com vantagens, em substituição às soluções convencionais. Entretanto, a viabilidade econômica desta substituição deve ser analisada caso a caso [9].

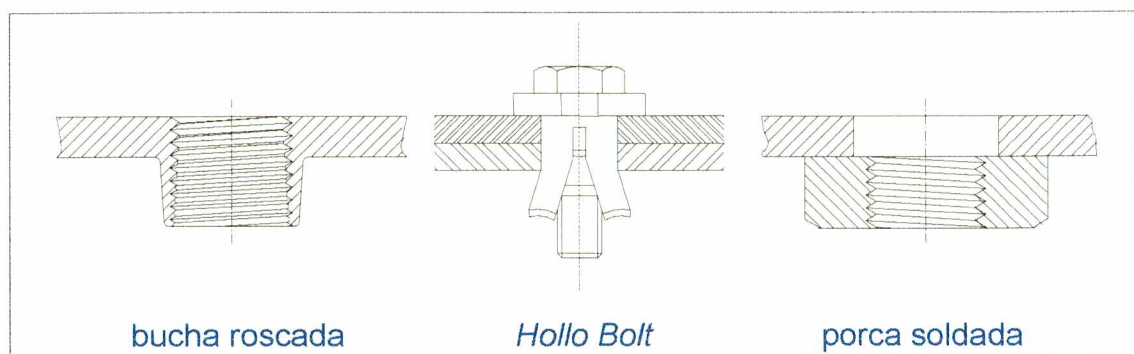


FIGURA 2 - Comparação entre tecnologias de fixação em chapas finas [8,9].

2.3.2

Estruturas metálicas da construção civil

Neste campo de aplicação geralmente são utilizadas fixações roscaadas de grandes diâmetros em chapas mais espessas, em função de solicitações mais críticas em trabalho, como a da estrutura ilustrada na figura 3. Embora a utilização da furação por escoamento neste tipo de aplicação ainda não tenha sido largamente difundida, estudos mais recentes [10] demonstram que buchas roscaadas são capazes de suportar elevadas cargas de tração e de cisalhamento, sendo, portanto, adequadas ao uso em estruturas metálicas.

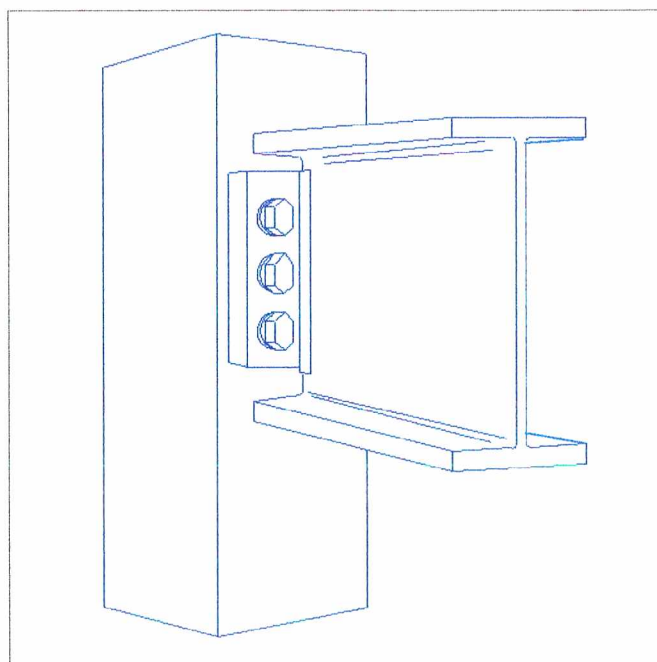


FIGURA 3 – Estrutura metálica fixada com buchas roscaadas [11].

2.3.3

Tubos e vasos de pressão

Buchas roscadas também encontram aplicações com êxito em sistemas submetidos a altas pressões de trabalho, como a da figura 4, os quais muitas vezes são submetidos a solicitações dinâmicas.

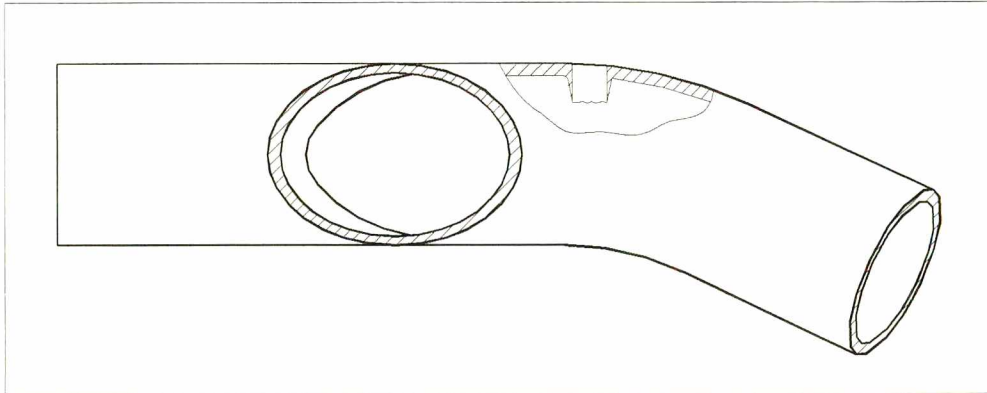


FIGURA 4 – Peça de escapamento de automóvel [12].

Em tubulações fechadas o uso desta tecnologia permite a produção de fixações sem a necessidade de acesso ao interior do tubo. Nesta situação a não-produção de cavacos se apresenta como uma vantagem decisiva.

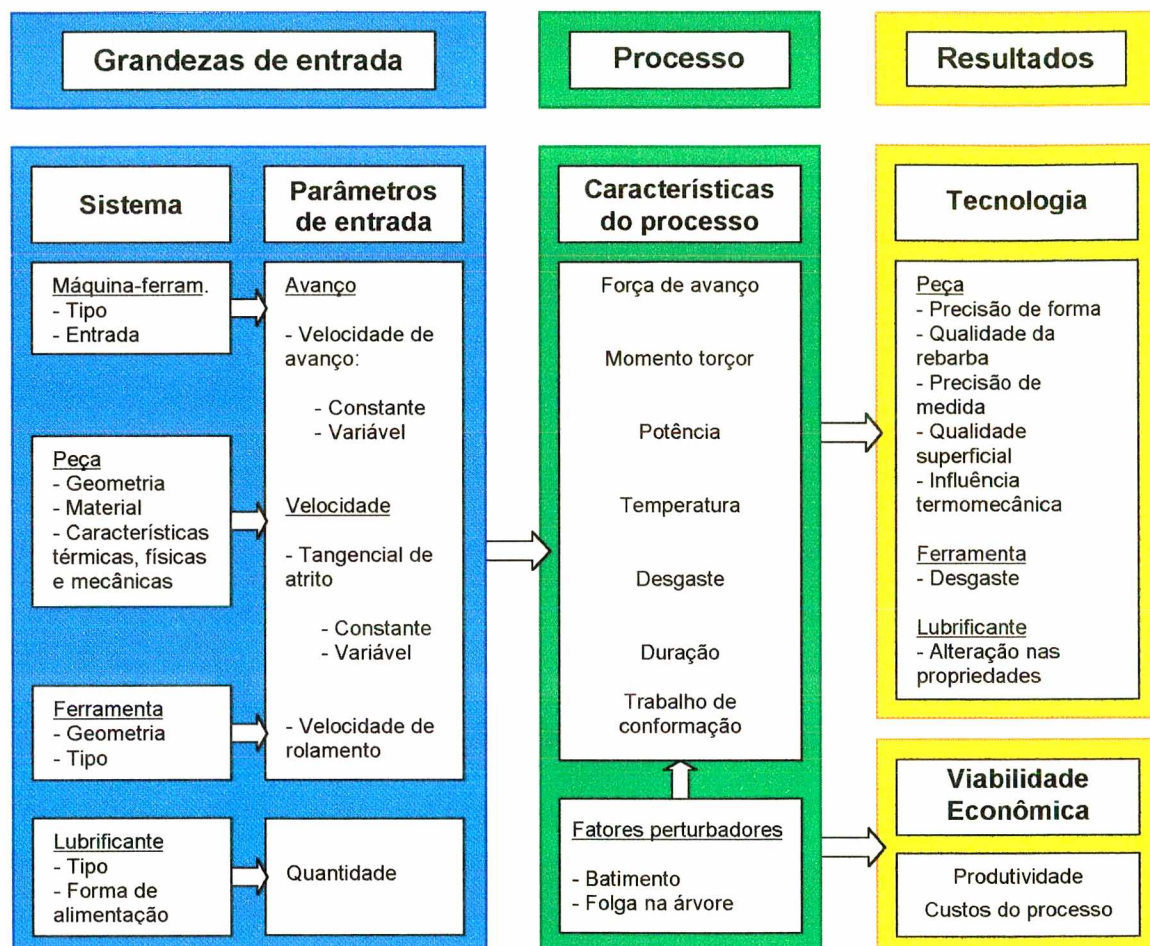
2.4

Características da Furação por Escoamento como Processo

Uma visão geral da furação por escoamento, suas diversas grandezas e resultados de trabalho [13], é apresentada na tabela 1. As grandezas de entrada estão subdivididas em dois grupos principais: grandezas de sistema, cuja alteração não é imediata, e as variáveis de entrada, que normalmente podem ser modificadas diretamente *in loco*, na máquina. As grandezas de processo e resultados de trabalho são as variáveis dependentes das grandezas de entrada.

De acordo com esta classificação, as principais grandezas e resultados de trabalho são abordadas a seguir. A influência térmica e a análise das transformações microestruturais serão apresentadas em uma seção em separado.

TABELA 1 - Principais grandezas e resultados de trabalho da furação por escoamento [13].



2.5 Grandezas de Entrada

2.5.1 Sistema

Na furação por escoamento podem ser utilizadas as mesmas máquinas-ferramentas empregadas em outros processos de furação. Entretanto, na seleção da furadeira deve-se garantir rigidez e potência de acionamento suficientes, bem como uma faixa de rotações disponíveis adequada. O uso de máquinas CNC é recomendado, pelas características acima e também pela possibilidade de programação da rotação e da velocidade de avanço de forma

variável em processo, permitindo uma otimização dos resultados de trabalho e do tempo de processo [14].

Em relação à peça devem ser levados em consideração o seu material, a geometria, as suas respectivas propriedades termofísicas/mecânicas e também a distância entre os furos [13]. A espessura mínima da peça necessária à produção da bucha situa-se na faixa de 1,5 a 2,0 mm, quando ferramentas para M6 e M8 podem ser utilizadas [15,16]. Como limite superior tem-se o valor de 16,0 mm de espessura, em ferramentas com diâmetro > 20 mm [10].

Ferramenta

Fabricada atualmente em metal duro, a ferramenta de furação por escoamento possui uma geometria especial da parte ativa, como representado pela seção AA da figura 5. Esta geometria, denominada cônico-poligonal e composta de lóbulos salientes, é responsável pelo deslocamento localizado do material da peça, gerando calor e fazendo com que o material aumente sua plasticidade.

Como ilustrado na figura a seguir, a ferramenta da furação por escoamento pode ser dividida em vários segmentos: ponta, parte cônica e parte prismática, que compõem a parte ativa. Acima do colar encontra-se a haste de fixação da ferramenta no mandril [3].

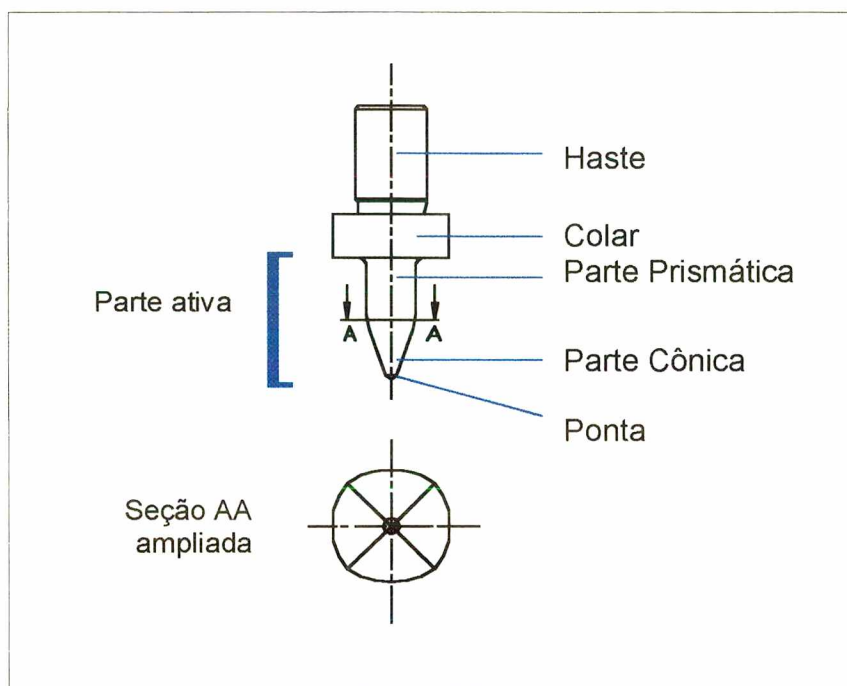


FIGURA 5 – Geometria da ferramenta de furação por escoamento [3].

As ferramentas são basicamente classificadas em curtas e longas, referentes ao comprimento da parte prismática, como mostrado na figura 6. A ferramenta longa gera uma bucha cilíndrica, que pode servir como ponto de brasagem ou ser rosçada, atuando então como união aparafusada.

Na versão curta o comprimento da ferramenta é de 10% a 30% menor que o da ferramenta longa, produzindo uma bucha levemente cônica, que é mais adequada para o rosqueamento [1], por permitir a fabricação de uma bucha rosçada mais resistente. Outras variações de geometria também são apresentadas na figura abaixo.

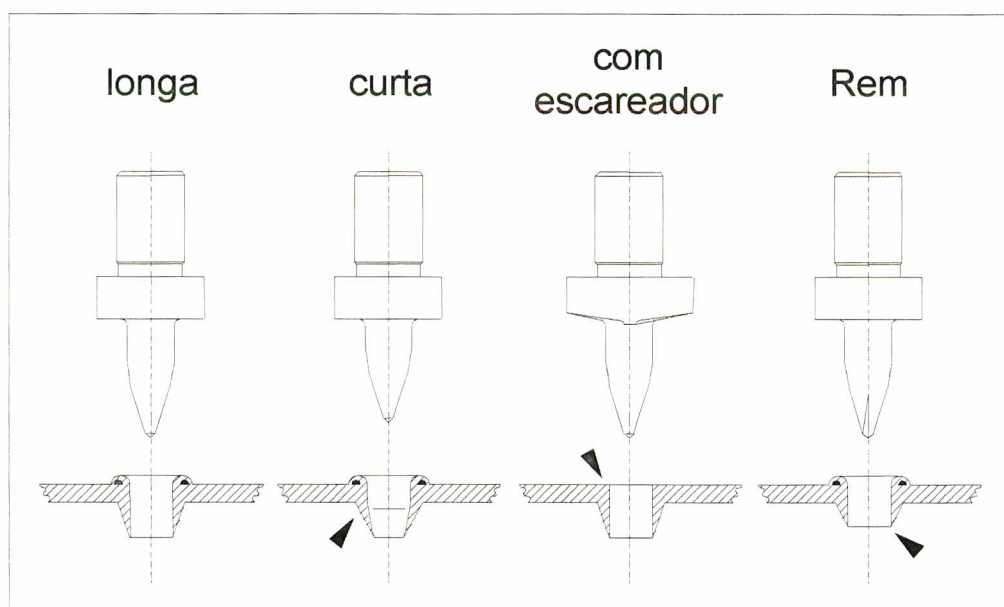


FIGURA 6 - Tipos de ferramenta de furação por escoamento [17].

Na ferramenta com escareador é retirado o material que escoou para a superfície superior da chapa, através dos gumes presentes no colar, a fim de obter uma superfície plana ou produzir o escareamento da borda do furo.

A ferramenta tipo *Rem*, do fabricante Flowdrill® B.V., possibilita o uso de furadeiras manuais na furação por escoamento. Este tipo de ferramenta possui uma afiação especial da ponta, que reduz a força de avanço no início do furo pela remoção de material. Isto é particularmente necessário na furação em campo, de peças grandes ou de estruturas de aço montadas, onde não seria possível a utilização de máquinas-ferramentas que não fossem portáteis. Da mesma maneira a ferramenta *Rem* pode ser utilizada na remoção de

eventuais tratamentos superficiais da chapa, como os de cromo e zinco, que podem dificultar a execução do processo [1].

Atualmente são desenvolvidas novas pesquisas referentes ao material e a geometria da ferramenta. Já existem disponíveis no mercado ferramentas em Cermet, da firma Drabus, cujo vida apresentada pelo fabricante é 150% maior que a vida da ferramenta de metal duro [18], que é de aproximadamente 6 mil furos. Materiais cerâmicos estão sendo estudados como uma possível substituição ao metal duro, como a alumina (Al_2O_3) e nitreto de silício (Si_3N_4). A geometria da ferramenta como um todo está sendo investigada, com o objetivo de fabricar ferramentas mais adequadas a determinadas aplicações, de chapas finas a chapas mais espessas, e também a diferentes materiais, como aço inoxidável, alumínio, cobre e latão.

Lubrificação e arrefecimento

Durante a execução da furação por escoamento em aço são observadas cores rubras da ferramenta e do material da chapa em aquecimento, como mostrado na figura 7.

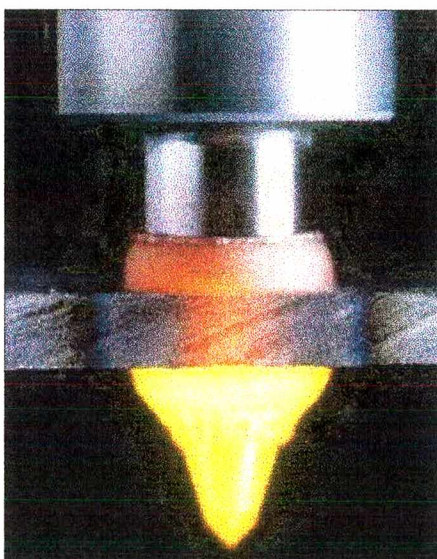


FIGURA 7 - Cores rubras durante o processo de furação por escoamento [19].

Variando desde vermelho escuro (680 °C) até vermelho claro (800 °C), as cores do material indicam a necessidade de utilização de um lubrificante [1].

Uma fina camada da pasta FdKS [17], aplicada em intervalos regulares, como mostrado na figura 8, reduz o atrito entre a ferramenta e a peça.

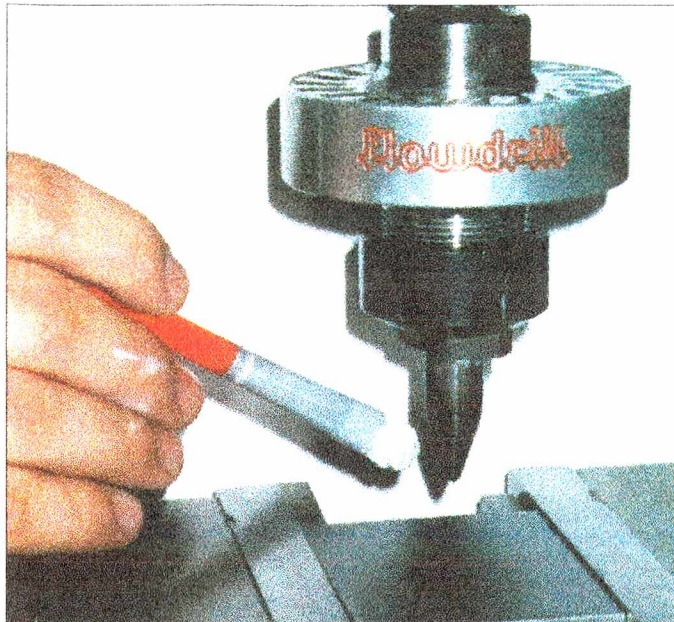


FIGURA 8 - Aplicação do lubrificante na ferramenta.

Como proteção do suporte da ferramenta e da árvore da máquina contra o excesso de aquecimento é utilizado um mandril aletado, como ilustrado na figura 9, responsável pela dissipação do calor excedente gerado pelas altas temperaturas alcançadas durante o processo.

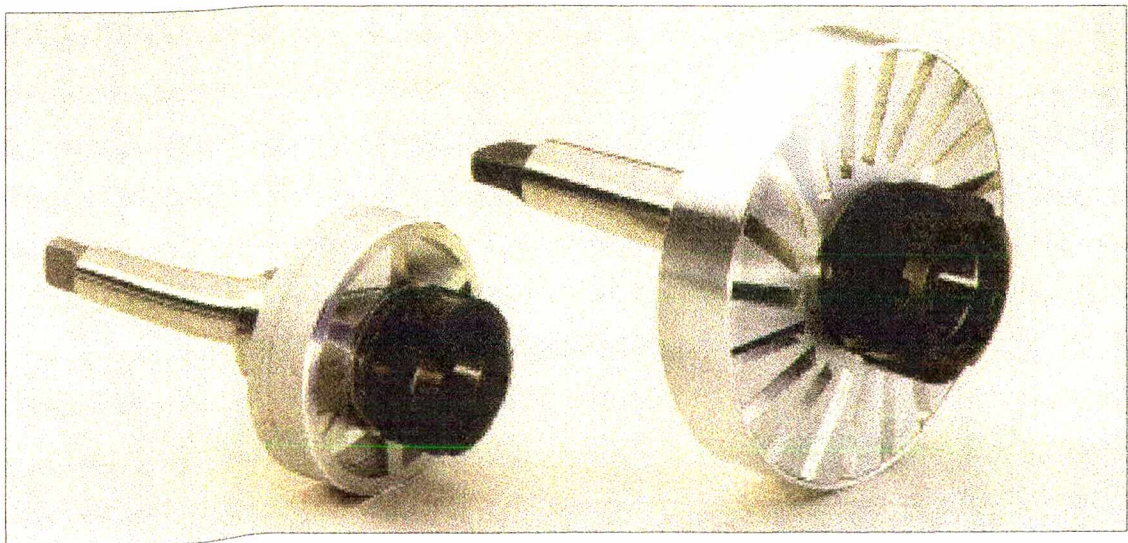


FIGURA 9 – Mandris aletados especiais para a furação por escoamento, do fabricante Zecha [19].

2.5.2 Parâmetros de entrada

As variáveis de entrada na furação por escoamento são comparáveis às da furação convencional, entretanto pretende-se utilizar aqui uma terminologia mais apropriada. A velocidade de avanço (v_f) é responsável pelo movimento de penetração da ferramenta na peça, assim como na furação com brocas helicoidais. Esta grandeza é equivalente ao avanço [mm/rot] utilizado em máquinas convencionais, o qual é função da rotação (n). Portanto, quando máquinas convencionais forem usadas, a velocidade de avanço não pode ser alterada durante o processo, se a rotação for mantida constante [13]. Em máquinas CNC esta grandeza é dada em mm/min, como ilustrado na figura 10, podendo ser programada independente da rotação, aproveitando os recursos de variação automática de velocidade.

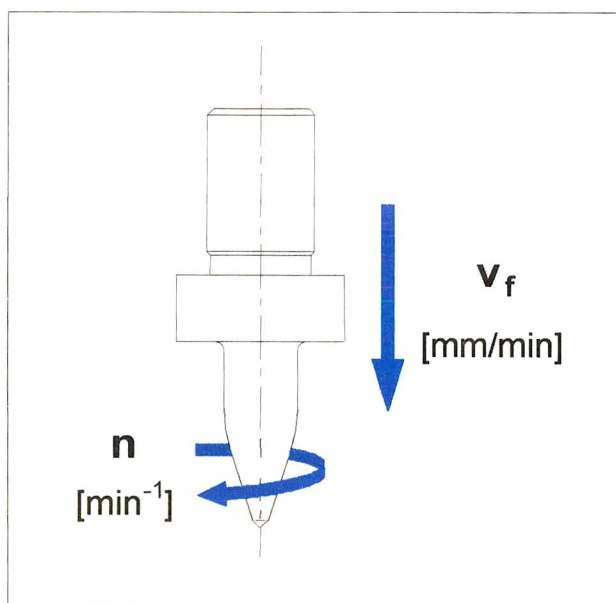


FIGURA 10 – Variáveis de entrada (condições de trabalho) rotação (n) e velocidade de avanço (v_f) em máquinas CNC.

A velocidade de corte (v_c) é substituída na furação por escoamento pela velocidade tangencial da ferramenta, que depende diretamente da rotação. Em rotação constante ela varia durante a entrada da parte cônica da ferramenta na peça e logo em seguida se torna constante, em função da ação da parte prismática.

De acordo com a literatura sobre furação por escoamento, onde ao invés da velocidade tangencial é utilizada a rotação como variável de entrada, esta última permanece neste trabalho como tal.

As condições de trabalho devem ser selecionadas basicamente em função do diâmetro da ferramenta, do material e da espessura da chapa a ser trabalhada. Segundo a literatura [3,14], o processo se comporta de maneira bastante distinta em diferentes materiais. Este fato está correlacionado com as diferentes propriedades de cada material, como condutividade térmica, resistência mecânica e plasticidade.

Em chapas de aço, por exemplo, existe uma ampla faixa de valores de rotação e velocidade de avanço que produzem bons resultados de trabalho, como por exemplo uma boa qualidade de bucha. Já para o alumínio, devem ser escolhidos valores de rotação e velocidade de avanço mais elevados que os do aço, para que a mesma qualidade de rebarba seja obtida. Este fato restringe de certa maneira a utilização do processo em alumínio com máquinas convencionais, onde altas rotações geralmente não estão disponíveis [3,14].

2.6 Grandezas de Processo

Quando a furação por escoamento é utilizada na produção de pequenos lotes de peças, onde o uso de máquinas-ferramentas convencionais é suficiente, a otimização do processo se resume geralmente à seleção da rotação e do avanço adequados, para a obtenção de buchas com boa qualidade de rebarba. Por outro lado, para uma utilização econômica e otimizada da furação por escoamento na produção de grandes lotes ou de peças complexas, o comportamento das grandezas do processo também deve ser mantido sob controle [13].

2.6.1 Força de avanço (F_f) e momento torçor (M_t)

A força de avanço e o momento torçor são os esforços principais que atuam na ferramenta durante a execução do furo, como ilustrado na figura 11, e variam basicamente em função das variáveis de entrada, da ferramenta e das características do material e da geometria da peça.

A força de avanço é o esforço de resistência do material da chapa à penetração da ferramenta, resultante do movimento de avanço. Atua na direção do eixo Z da máquina e é a grandeza de maior influência na vida dos elementos da máquina-ferramenta, como mancais do eixo-árvore, suportes de ferramenta e outros [1].

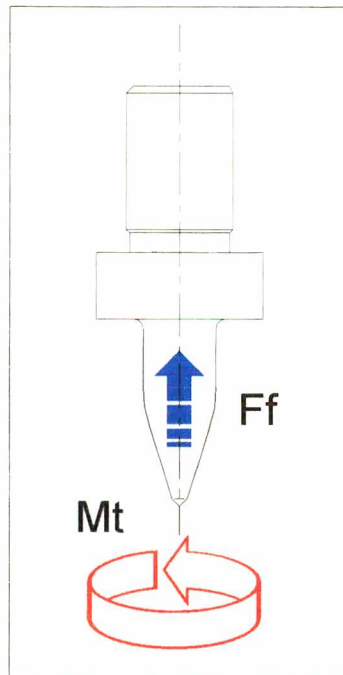


FIGURA 11 - Esforços atuantes na ferramenta durante a furação por escoamento.

A força de avanço depende fortemente das condições de trabalho. Com o emprego de velocidades de avanço mais elevadas os níveis de força de avanço tendem a subir, em função da redução do tempo disponível para que o material adquira plasticidade [3]. Por outro lado, com a utilização de rotações mais elevadas o material é mais aquecido, resultando em baixos níveis de força de avanço, devido à redução mais intensa do limite de escoamento do material.

O esforço contrário à rotação da ferramenta é o momento torçor, o torque a ser vencido pela potência de acionamento para a fabricação da bucha. Através do momento torçor é fornecida a maior parcela de energia empregada para a execução do processo [1].

O momento torçor depende principalmente da rotação, mas também é influenciado de forma decisiva pelo aumento da velocidade de avanço, que diminui a temperatura máxima alcançada pelo material e que portanto leva a maiores esforços de torque na ferramenta [3].

O comportamento tanto do momento torçor como da força de avanço devem ser considerados quando a vida da ferramenta é analisada, já que os mecanismos de desgaste também dependem das solicitações mecânicas às quais a ferramenta é submetida.

2.6.2

Cinemática da furação por escoamento

A cinemática do processo de furação por escoamento refere-se ao comportamento das grandezas de processo força de avanço e momento torçor, em dependência das variáveis de entrada.

Tradicionalmente a cinemática do processo era classificada em dois casos distintos, que se referiam ao movimento de penetração da ferramenta na peça. O primeiro caso considera a aplicação de uma força externa constante, e o segundo refere-se ao uso do mecanismo de avanço da máquina-ferramenta, que em máquinas convencionais significa o uso de velocidades de avanço constantes.

Com o uso de máquinas-ferramentas CNC, onde a rotação e a velocidade de avanço são programadas de forma independente, a cinemática do processo de furação por escoamento passou a compreender uma terceira alternativa, onde a velocidade de avanço e a rotação podem ser variadas em processo.

- Força de avanço externa

Nas primeiras aplicações do processo, quando máquinas manuais de coluna ou de mesa foram utilizadas, a ferramenta era pressionada contra a peça com uma força de avanço constante [4], introduzida por uma carga externa. Desta forma a velocidade de avanço variava ao longo do tempo, dependendo do desenvolvimento do aquecimento e do escoamento do material [3].

Como mostrado na figura 12, a força de avanço atinge rapidamente um platô, equivalente ao valor da força F aplicada. À medida que o material é aquecido, a ferramenta penetra com maior velocidade, que corresponde ao instante em que a força de avanço diminui [3,20]. No início do processo, devido à pequena área de contato entre a ferramenta e a peça, o torque é pequeno. À medida que a ferramenta penetra na chapa e a área de contato aumenta, ocorre um aumento correspondente do momento torçor.

Para o trabalho com força de avanço constante são necessárias máquinas com potência de acionamento adequada. A utilização da furação por escoamento nestas condições, em função do longo tempo de processo (neste caso ≈ 44 s), só é viável de forma econômica na fabricação de pequenas séries de peças [2].

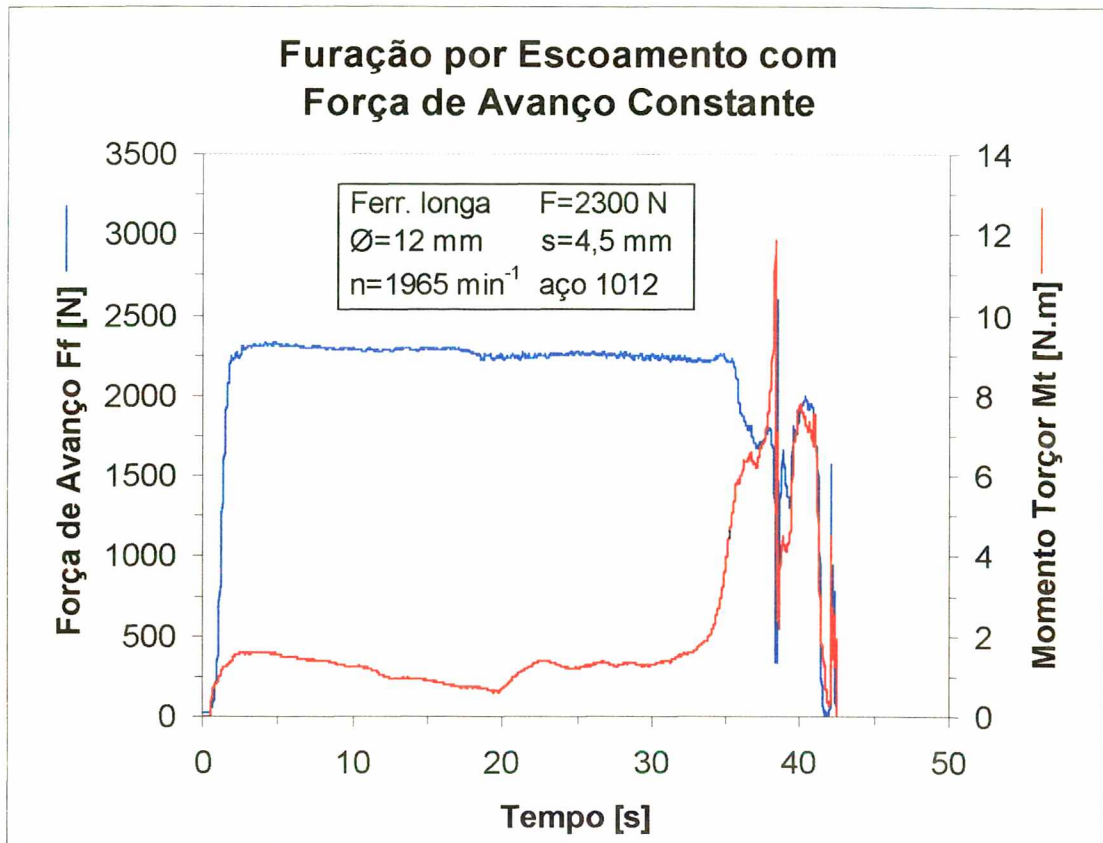


FIGURA 12 - Furação por escoamento com força de avanço aplicada constante [3].

- Velocidade de avanço constante

Com a utilização de velocidade de avanço constante, em máquinas convencionais com regulagem de avanço ou em máquinas CNC, a força de avanço é variável ao longo do tempo, assim como o momento torçor, como mostrado na figura 13.

Nestas curvas podem ser definidos alguns pontos principais, onde há nitidamente uma mudança de comportamento da força de avanço e do momento torçor. A partir destes pontos na curva de força de avanço são definidas as diferentes fases do processo.

1 - Fase inicial

Na entrada da ponta da ferramenta na peça a força de avanço cresce linearmente, com o material inicialmente sendo deformado na direção contrária ao avanço. O momento torçor segue um comportamento semelhante, devido à crescente área de contato entre a

ferramenta e a peça, entretanto, defasado em relação à força de avanço. Na superfície inferior da chapa gradativamente se forma uma protuberância.

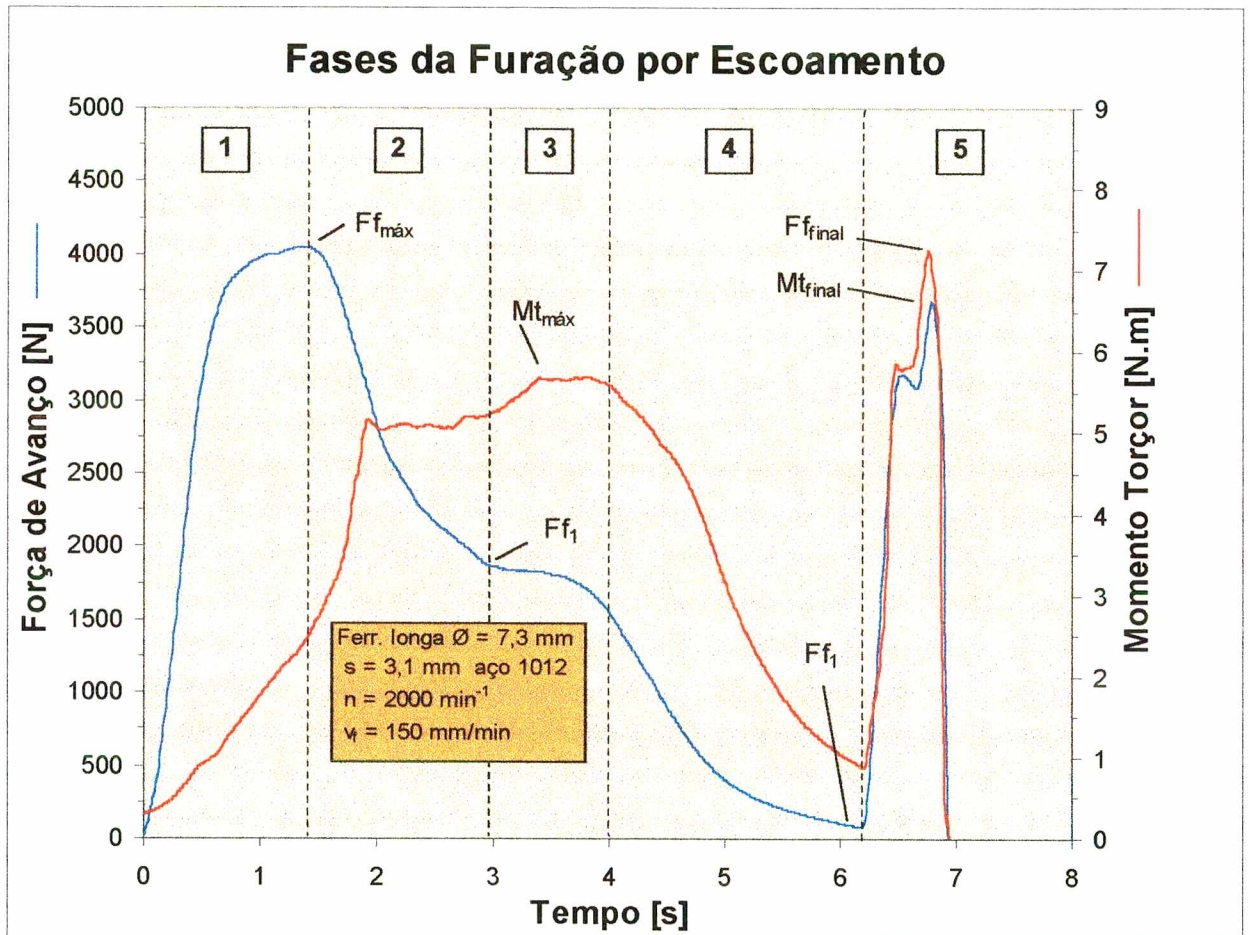


FIGURA 13 – Fases da furação por escoamento [14].

2, 3, 4 - Fases de escoamento

Depois que o valor máximo da força de avanço $Ff_{máx}$ é atingido, inicia-se o escoamento do material e, assim, a fase 2. Ao longo da fase a temperatura da peça está suficientemente elevada para diminuir a resistência ao escoamento do material. Após a ponta da ferramenta atravessar a chapa a força de avanço atinge o valor Ff_1 , permanecendo neste valor, de forma aproximadamente constante, caracterizando um platô. Durante a fase 2, e em boa parte da fase 3, o momento torçor permanece crescente, atingindo o seu valor máximo $Mt_{máx}$ geralmente no final da fase 3 ou no início da fase 4. Durante o escoamento na fase 4, à medida que a parte cônica da ferramenta vai atravessando a chapa, tem-se a

diminuição da força de avanço. O seu valor mínimo Ff_2 no final desta fase determina o início da fase final.

5 - Fase final

A parte final da conformação da bucha se caracteriza pelo tratamento da rebarba superior [3], proveniente do material que escoou para a superfície superior da chapa. Esta rebarba pode ser removida através dos gumes presentes nas ferramentas com escareador, ou conformada por um colar, quando uma ferramenta padrão for utilizada. O contato dos gumes ou do colar com a superfície da peça leva aos picos de força de avanço Ff_{final} e momento torçor Mt_{final} . Estes valores são maiores em ferramentas com colar conformador, em comparação com as de gumes escareadores.

O valor de força de avanço $Ff_{máx}$ é relevante também para as aplicações onde peças de espessura muito fina e grande área são usadas, cujas paredes podem sofrer flexão e deformar-se durante o processo, caso exista um vão livre muito grande entre os apoios. O estudo das forças na furação por escoamento pode prever a necessidade do uso de batentes ou suportes na execução dos furos [9].

- Velocidade de avanço variável

Uma das novas tendências no uso da furação por escoamento refere-se ao aumento da velocidade de avanço em máquinas CNC. A diminuição do tempo principal de processo em até 75%, em conjunto com uma forma de bucha mais adequada, indica que melhores resultados de trabalho podem ser obtidos com esta nova abordagem na escolha das condições de trabalho [14].

Por outro lado, o aumento na velocidade de avanço em processo elevam tanto a força de avanço quanto o momento torçor, o que por consequência exige uma maior potência de acionamento da máquina-ferramenta [14].

2.6.3

Potência mínima requerida para a conformação da bucha

Para a realização do processo a árvore da máquina-ferramenta deve fornecer uma potência mínima necessária, cujo valor depende de $Mt_{máx}$. O valor de momento $Mt_{máx}$ nem

sempre é o máximo de toda a curva de momento torçor. O valor Mt_{final} da fase de tratamento da rebarba é possivelmente maior do que $Mt_{\text{máx}}$, quando ferramentas com colar conformador são empregadas. Entretanto, a escolha do valor $Mt_{\text{máx}}$ da fase de escoamento, para o cálculo da potência mínima de acionamento, é justificada pelo fato dos esforços de torque nesta etapa solicitarem o eixo-árvore da máquina por um tempo mais longo, durante o qual o motor poderia ser danificado por uma sobrecarga. Devido à curta duração do valor Mt_{final} , este não constitui nenhum risco de dano ao acionamento da máquina.

A potência de acionamento mínima requerida durante o processo pode ser obtida pela equação 1 [9,14]. A velocidade angular ω da ferramenta, função da rotação n , é calculada através da equação 2.

$$P = Mt_{\text{máx}} \cdot \omega \quad (1)$$

$$[\text{kW}] = [\text{Nm}] \cdot [\text{s}^{-1}] \cdot [10^{-3}]$$

$$\omega = \frac{\pi}{30} \cdot n \quad [\text{s}^{-1}] \quad (2)$$

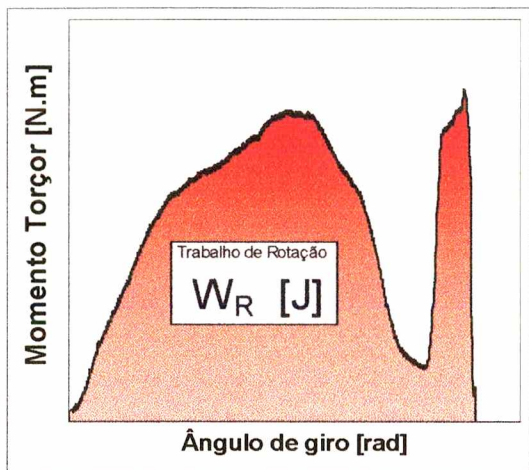
2.6.4

Trabalho de translação (W_T) e rotação (W_R)

Para uma avaliação correta da influência térmica devido à furação por escoamento, deve ser feita uma análise da introdução de energia mecânica durante o processo. Esta energia é composta de uma pequena parcela de atrito dinâmico entre a ferramenta e a peça [1]. A maior parte se deve ao trabalho de conformação do material, que é composto por duas componentes: o trabalho de rotação (W_R) e o trabalho de translação (W_T).

O trabalho na furação por escoamento é realizado num espaço de tempo relativamente curto, o que leva a níveis de potência de acionamento geralmente mais elevados que os da furação convencional [1]. A sua componente de rotação é a parcela de trabalho realizada pelo giro da ferramenta, responsável neste processo pela maior parte da transformação de energia mecânica em calor, através do trabalho de atrito e de deformação radial [13]. O movimento de avanço realiza o trabalho de translação, que promove a deformação do material na direção de penetração da ferramenta e é responsável pelo tempo disponível para a conformação da bucha, que depende da taxa de transferência de calor da região do furo para o restante do material da peça.

A área abaixo da curva do momento torçor em função do ângulo de giro φ (figura 14) representa o trabalho de rotação W_R realizado na furação por escoamento, calculado através da equação 3 [1].



$$W_R = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} Mt \cdot d\varphi \quad [J] \quad (3)$$

FIGURA 14 – Trabalho de rotação W_R .

O ângulo de giro φ depende do tempo de processo t e da velocidade angular ω (equação 4). A partir da equação 2 se obtém o ângulo de giro em função da rotação, como mostrado na equação 5.

$$\varphi = \omega \cdot t \quad [\text{rad}] \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{\pi}{30} \cdot n \cdot t \quad [\text{rad}] \quad (5)$$

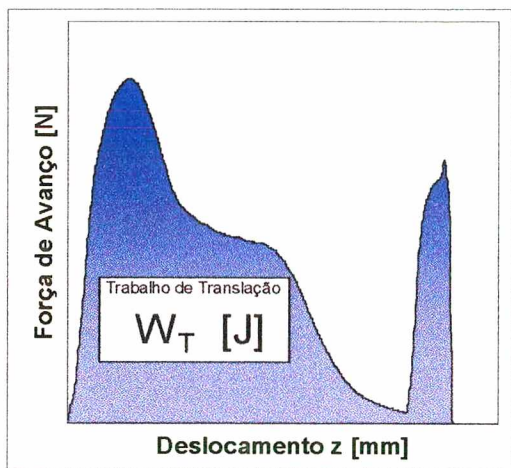
O trabalho de rotação W_R é então obtido pela integral modificada (equação 6), em função do tempo t .

$$W_R = \frac{\pi}{30} \cdot n \int_{t_1}^{t_2} Mt \cdot dt \quad [J] \quad (6)$$

No início do processo, o movimento de translação da ferramenta sofre a resistência do material, refletida quase que somente na força de avanço. Nesta fase o material da peça sofre um processo similar ao da deformação a frio, sendo deslocado em sentido contrário ao da penetração da ferramenta. Neste curto intervalo de tempo a energia necessária à

conformação do material é praticamente fornecida somente pelo trabalho de translação (figura 15).

O trabalho de translação W_T é representado pela área abaixo da curva da força de avanço em função do deslocamento z na direção do eixo de penetração da ferramenta, que pode ser obtido pela equação 7.



$$W_T = \int_{z_1}^{z_2} F_f \cdot dz \quad [J] \quad (7)$$

FIGURA 15 – Trabalho de translação W_T .

A transformação do deslocamento z em tempo t pode ser obtida pela equação 8:

$$z = \frac{v_f \cdot t}{6 \cdot 10^{-4}} \quad [m] \quad (8)$$

O cálculo do trabalho de translação é então efetuado pela equação modificada (equação 9).

$$W_T = \frac{v_f}{6 \cdot 10^{-4}} \int_{t_1}^{t_2} F_f \cdot dt \quad [J] \quad (9)$$

O trabalho de conformação total W_F , que representa a energia em Joules aplicada na conformação da bucha, é dado pela soma dos trabalhos de rotação e translação, como mostrado pela equação 10.

$$W_F = W_R + W_T \quad [J] \quad (10)$$

Segundo Müller-Kraus [1], o trabalho de rotação corresponde a cerca de 99% do trabalho total de conformação, ou seja, $W_R \gg W_T$.

2.6.5 Temperatura da bucha

A temperatura é de grande relevância no estudo da furação por escoamento, devido à sua influência nas propriedades do material (limite de escoamento, conformabilidade) no desgaste da ferramenta e nas transformações microestruturais do material da peça.

As primeiras medições de temperatura na furação por escoamento foram realizadas por Kretschmer [20], que realizou medições na região da bucha utilizando diferentes métodos, como bastões de cores, pirômetro infravermelho e termopares. Segundo este autor, outros métodos físicos poderiam ser utilizados, como os de sais de metais pesados e cristais líquidos, em substituição aos bastões de cores [20].

Inicialmente foram realizados testes utilizando bastões de cores [20], cuja tinta muda de cor quando uma determinada temperatura é atingida. Utilizando este método, em chapas de aço baixo carbono (DIN St 37) de 2,0 mm de espessura e ferramenta de 5,07 mm de diâmetro, foram obtidos valores da ordem de 560 °C na área ao redor da bucha. Na borda superior do furo, próximo à interface entre ferramenta e peça, foram obtidos valores da ordem de 715 °C [20]. O uso deste método é bastante limitado pela sua baixa precisão, já que a leitura dos resultados é fortemente influenciada pelo operador. Mais além, a observação das cores é bastante dificultada em furos de pequenos diâmetros, onde o baixo aquecimento e a sua curta duração não permitem uma mudança de cor nítida das tintas [20].

A medição sem contato através de pirômetros infravermelhos foi o segundo método utilizado por Kretschmer. Com este equipamento, ilustrado na figura 16, foram encontradas temperaturas da ordem de 680 °C a 710 °C [20] em aço St 37. Este método não oferecia uma precisão suficiente, devido à difícil regulagem do aparelho, que dependia do ângulo de emissão de radiação do corpo a ser medido, o qual variava muito durante o processo.

Embora a medição de temperatura na furação por escoamento seja dificultada pela presença de elevados gradientes de temperatura, da ordem de 300 °C/s [21], o uso de termopares se mostrou o método mais preciso e mais adequado às condições impostas pelo processo [2]. Nos ensaios com termopares de NiCr e Ni, as extremidades dos mesmos foram brasadas na região adjacente ao furo, fora da área de escoamento (figura 17).

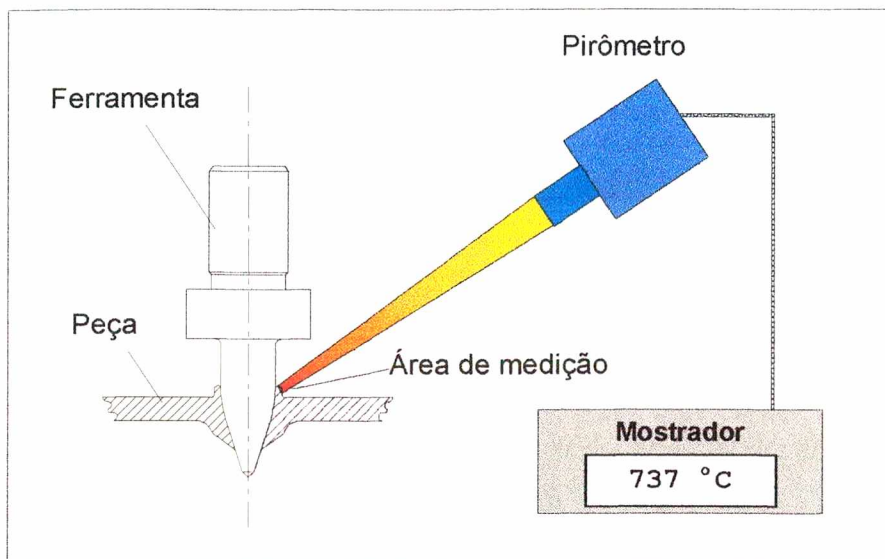


FIGURA 16 - Medição de temperatura com pirômetro [3].

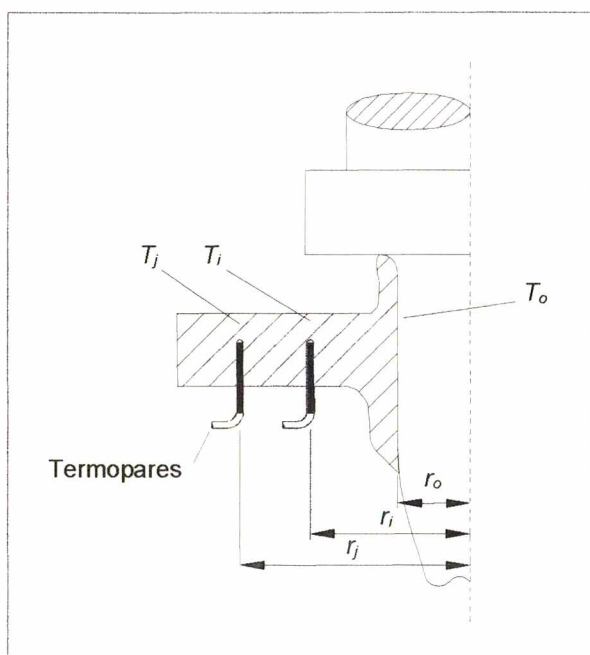


FIGURA 17 – Medição de temperatura através de termopares [20].

Usando um modelo matemático pode-se estimar o valor de temperatura máxima na interface da ferramenta com a peça, a partir dos dados máximos de temperatura medidos em pontos afastados radialmente do centro do furo.

Este modelo foi desenvolvido considerando a distribuição de temperatura da furação por escoamento como sendo um problema unidimensional de condução de calor, com

distribuição radial simétrica na direção do avanço. A formulação deste problema, no regime permanente, desconsiderando a transmissão de calor por convecção e radiação, é apresentada na equação 11.

$$T_o = T_i + \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \cdot \frac{T_j - T_i}{\ln\left(\frac{r_j}{r_i}\right)} \quad [^\circ\text{C}] \quad (11)$$

Através desta equação pode-se estimar a temperatura T_o no diâmetro interno da bucha de raio r_o , a partir dos valores máximos de temperatura T_i e T_j , medidos respectivamente nos pontos r_i e r_j distantes do centro da bucha, como ilustrado na figura 17.

De um experimento realizado com uma ferramenta de 5,07 mm de diâmetro em uma chapa de aço baixo carbono de 2,0 mm de espessura, foram obtidas temperaturas da ordem de 470 °C na interface, utilizando esta formulação.

Procedimento semelhante também foi adotado por Lopes [3] para a medição de temperatura com termopares. Utilizando uma chapa de baixo carbono de 3,0 mm de espessura, com uma ferramenta de 11,7 mm de diâmetro, foram estimados valores da ordem de 770 °C na região de contato ferramenta-peça [3]

Ainda utilizando termopares, Kretschmer [2] realizou outra série de experimentos, desta vez posicionando os termopares na região de passagem da ferramenta, para medição direta da temperatura no material em escoamento. Este procedimento pretendia obter resultados mais significativos. A fixação dos termopares nesta situação é ilustrada na figura 18.

Para uma chapa de aço DIN St 37 de 2 mm de espessura, com uma ferramenta de 12 mm de diâmetro, foram obtidos os resultados plotados na figura 19. Neste caso o valor máximo de temperatura foi da ordem de 800 °C.

Pode-se observar no gráfico da figura 19 que os valores de temperatura medidos na região de trabalho possuem um comportamento característico, função das temperaturas máximas alcançadas pelos termopares antes de serem inutilizados pelo contato com a ferramenta [2], durante a execução do processo. Nota-se também que à medida que aumenta a distância r ao centro do furo há uma diminuição nos valores de temperatura.

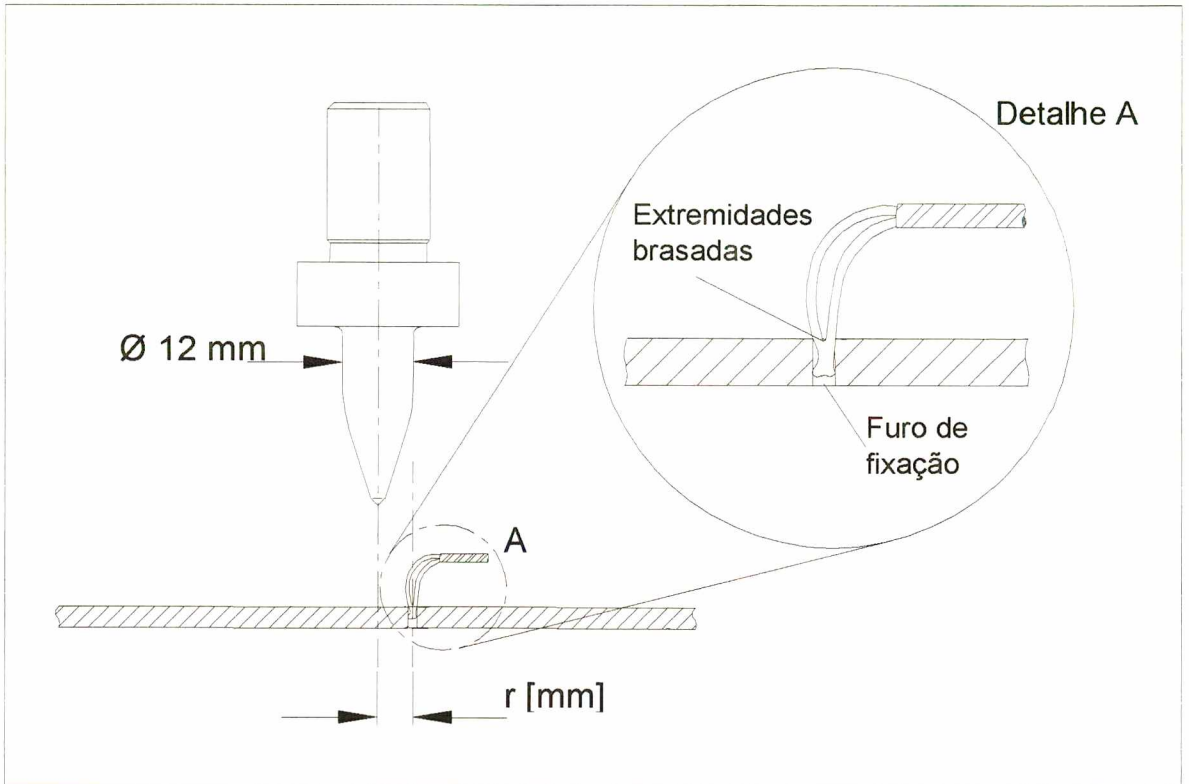


FIGURA 18 – Fixação de termopares na região de deformação [2].

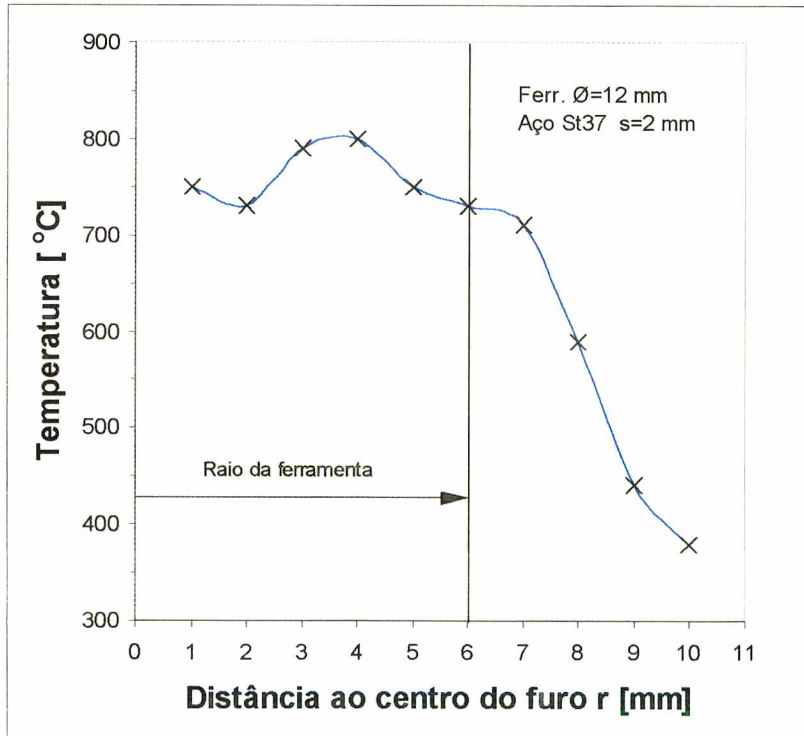


FIGURA 19 – Temperaturas na região de deformação [2].

2.6.6

Duração do processo

O tempo principal de produção de uma bucha pela furação por escoamento é uma grandeza de grande importância tecnológica e relevância econômica.

A duração do processo está relacionada ao tempo disponível para a conformação da bucha, durante o qual o material da peça se encontra aquecido e pode ser conformado. Este tempo, por sua vez, depende da quantidade de energia térmica introduzida, que é função basicamente da rotação.

A otimização do processo através da redução do tempo principal pode ser alcançada de duas maneiras: utilizando ferramentas mais curtas ou através do aumento da velocidade de avanço.

O uso de ferramentas mais curtas, sem alterar as condições de trabalho, pode reduzir o tempo principal de 10% a 30%, aproximadamente, dependendo do diâmetro da ferramenta [17]. Neste caso é produzida uma bucha de forma cônica.

A utilização de uma força externa constante na furação por escoamento, como força introdutora do movimento de avanço da ferramenta, como citado anteriormente, leva de modo geral a um tempo de processo muito longo, que pode inviabilizar economicamente o processo.

Uma solução mais moderna sugere a utilização de máquinas-ferramentas CNC e ao uso de maiores velocidades de avanço, quando então o tempo principal pode ser drasticamente reduzido [14]. Neste caso a força de avanço máxima $F_{f_{máx}}$, a potência consumida e a qualidade das rebarbas são os fatores que limitam o aumento da velocidade de avanço. Outra variável que pode ser economicamente limitante ao aumento da velocidade é a vida da ferramenta, a qual pode ser reduzida em função de maiores solicitações decorrentes da variação das condições de trabalho em processo.

2.7

Resultados de Trabalho

O comportamento de um processo de fabricação deve ser analisado principalmente pelos resultados de trabalho, que são as grandezas avaliadas após a execução do processo.

Para cada situação devem ser selecionados os resultados de trabalho mais relevantes, através dos quais o processo pode ser avaliado e então otimizado.

2.7.1

Forma e dimensões da bucha

A forma da bucha produzida é definida basicamente pelo tipo de ferramenta utilizada, onde uma ferramenta curta produz uma bucha cônica e uma ferramenta longa uma bucha cilíndrica [3,4].

A forma da bucha é relevante para o rosqueamento por conformação, para a produção da bucha roscada. Buchas com paredes mais espessas e de menor comprimento são mais adequadas, como as buchas de forma cônica, por resultarem em maior número de filetes completamente formados, gerando roscas de maior resistência. Buchas de maior comprimento, portanto de paredes mais finas, não levam a um maior número resultante de filetes completamente formados. Isto se deve ao fato de que a deformação radial da bucha durante o rosqueamento é mais intensa em paredes mais finas [1,14].

Como dimensões principais da bucha são definidas a espessura de parede e_p , o diâmetro do furo d e o comprimento total da bucha ℓ , ilustrados na figura 20.

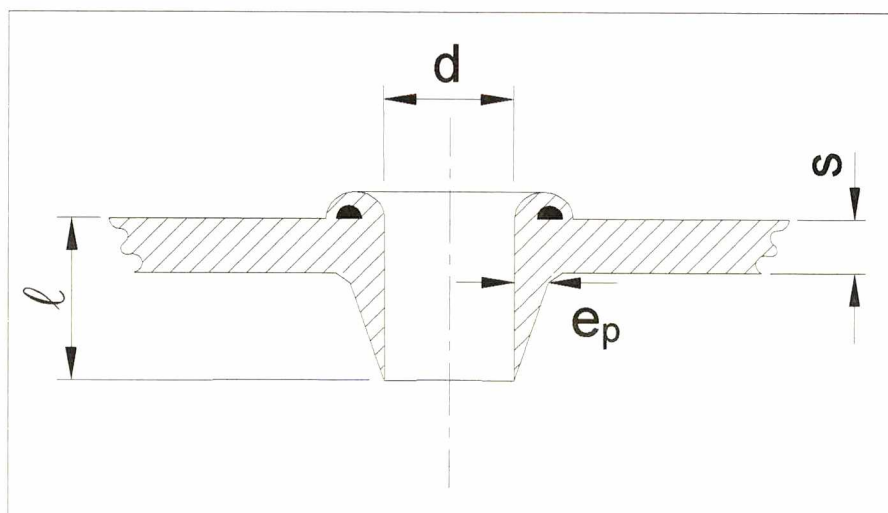


FIGURA 20 - Dimensões principais da bucha escocada [3].

Em experimentos anteriores verificou-se que o comprimento da bucha, quando velocidades de avanço constantes forem utilizadas, não é afetado de forma significativa pelas condições de trabalho [3,14]. Entretanto, com o uso de altas rotações e baixas velocidades de avanço notou-se um prolongamento do comprimento total ℓ , que segundo Heiler [14] não influenciou o rosqueamento por conformação nem a resistência à tração da bucha roscada.

2.7.2

Qualidade das rebarbas inferiores

Esta grandeza é atualmente um dos principais parâmetros de avaliação da qualidade de uma bucha produzida pela furação por escoamento.

Para avaliação da qualidade das rebarbas inferiores foi criado inicialmente um sistema de classificação [3], segundo o qual a qualidade das rebarbas correspondia, dentro de faixas determinadas, à porcentagem δ do comprimento total ℓ da bucha, que era atingida pela profundidade da ruptura formada na extremidade inferior da rebarba.

Esta classificação foi adaptada e apresentada de forma mais otimizada por Heiler [14], que modificou a profundidade de ruptura máxima admissível de cada grupo de qualidade, como mostrado na figura 21.

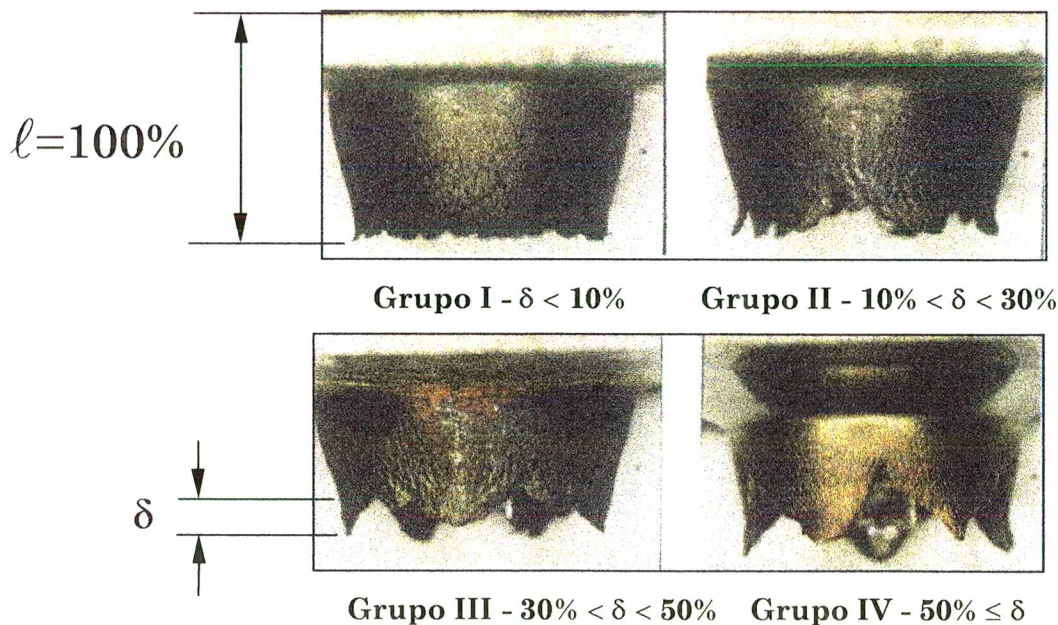


FIGURA 21 - Qualidade das rebarbas inferiores, segundo Heiler [14].

Com buchas de qualidades I e II podem ser produzidas fixações com comprimento efetivo de rosca adequado. A partir da qualidade III a fabricação de uma fixação roscada de alta resistência é limitada. Nas buchas com $\delta > 50\%$ praticamente não há mais área disponível para o rosqueamento e a forma da bucha se aproxima à de uma coroa [3,14].

A formação de trincas nas rebarbas inferiores deve ser evitada, principalmente no uso da furação por escoamento em peças para sistemas hidráulicos ou pneumáticos (vasos

de pressão, tubulações de sistemas de aquecimento, tubulações de instalações a gás) ou peças que sofram solicitações dinâmicas, onde o risco de uma falha por fadiga é maior [14]. Posteriormente, pequenos cavacos podem ser arrancados da extremidade da bucha durante o rosqueamento por conformação, que podem ser prejudiciais, principalmente em sistemas tubulares fechados ou em vasos de pressão.

A qualidade das rebarbas é influenciada basicamente pelas condições de trabalho e pela relação entre o diâmetro da ferramenta e a espessura da chapa. Entretanto, em materiais diferentes, essa influência é diferenciada. Como grandeza de maior influência se destaca a rotação n da ferramenta, que produz a maior parcela de calor necessária ao escoamento do material e à conformação da bucha. São necessárias altas rotações, principalmente em materiais de alta condutividade térmica, para assegurar a fabricação de buchas de boa qualidade. A velocidade de avanço, quando constante, tem uma influência secundária [14]. Em aço de baixo carbono, entretanto, buchas de boa qualidade são obtidas principalmente em baixas rotações [14].

Na fabricação industrial, estas considerações indicam que a furação por escoamento, quando ocorrem problemas iniciais com relação à qualidade das rebarbas, não deve ser classificada prematuramente como inadequada ou inviável. Uma adaptação da rotação e da velocidade de avanço deve ser efetuada, a fim de que a qualidade da rebarba seja melhorada.

2.7.3

Resistência à tração da fixação roscada

A resistência à tração da bucha roscada produzida pela furação por escoamento, em conjunto com o rosqueamento por conformação, pode ser representada pela carga de tração máxima F_K e pela classe de resistência de porcas.

A carga de tração F_K informa sobre a resistência à tração máxima da bucha roscada, enquanto que a classificação por classes de resistência determina a solicitação máxima admissível que pode ser suportada pela bucha, sem que a mesma tenha o seu desempenho em trabalho alterado, ou seja, sem que seja deformada de forma significativa [22].

O dispositivo para ensaio de tração de buchas roscadas, ilustrado na figura 22, serve tanto para ensaios de medição de carga de tração máxima como para a determinação de classes de resistência [9].

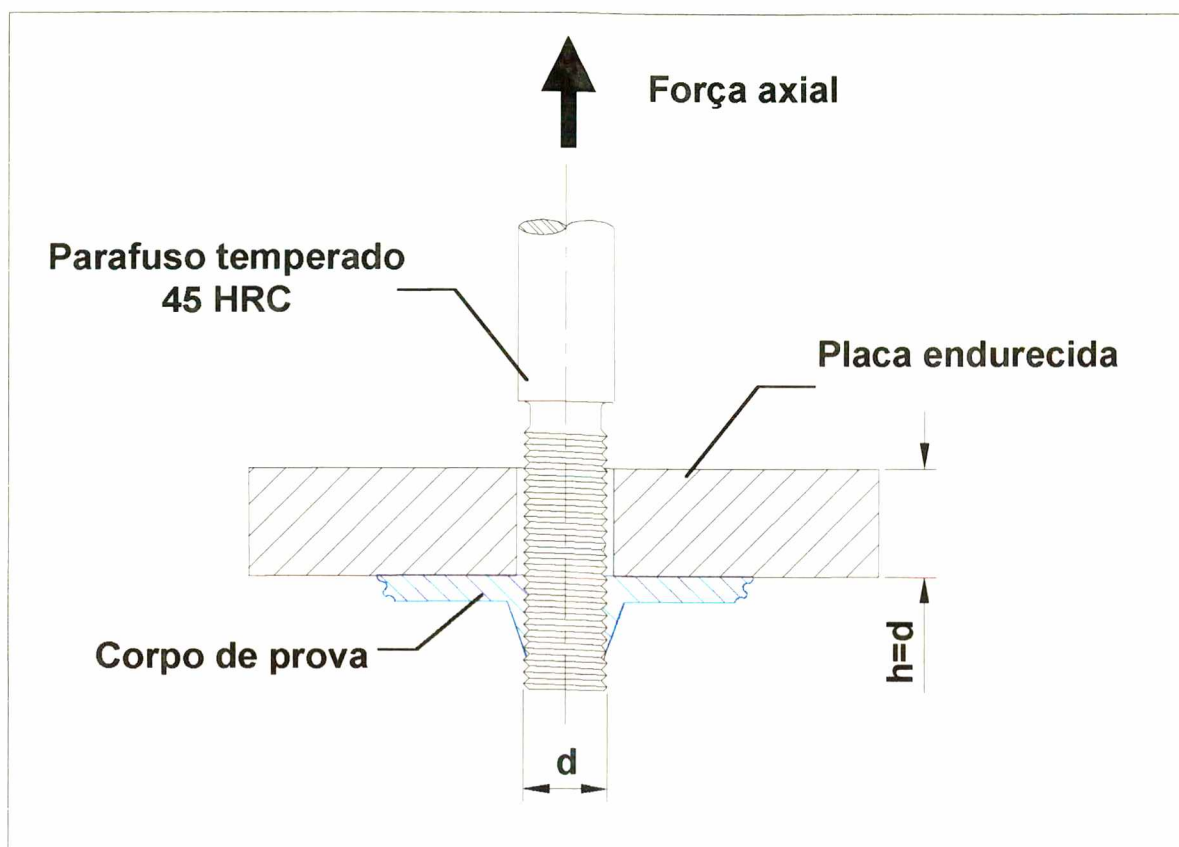


FIGURA 22 – Dispositivo do ensaio de tração, segundo DIN 267/4 [9].

Para a execução do ensaio de resistência à tração de uma bucha rosca deve-se seguir procedimento semelhante ao ensaio de tração convencional. A fixação rosca é tracionada a baixa velocidade, até a ruptura do corpo de prova, quando então a carga de resistência à tração máxima é medida.

Para os ensaios de determinação da classe de resistência devem ser seguidos os procedimentos da norma DIN 267 parte 4, que trata dos ensaios de resistência à tração de porcas normalizadas. Estes procedimentos são apresentados no anexo 12.12.

Esta norma define procedimentos de ensaio garantindo que, se uma porca pertence a uma certa classe de resistência, ela poderá ser carregada em trabalho com a carga de teste correspondente a esta classe de resistência, sem que os filetes sejam deformados, permanecendo com as propriedades mecânicas equivalentes às anteriores ao carregamento. Como princípio de projeto em fixações rosca, pode-se definir esta carga de teste como a carga máxima com a qual a porca pode ser solicitada.

2.8

Aspectos Metalúrgicos na Furação por Escoamento

As temperaturas atingidas pelo material da peça durante a furação por escoamento situam-se, na maioria dos casos, na faixa de 600 °C a 800 °C [20]. Esta faixa de temperatura situa-se entre os processos de conformação a morno e a quente [23].

Na conformação a morno o material é trabalhado numa faixa de temperaturas onde ocorre apenas recuperação, e o grau de endurecimento por deformação é portanto consideravelmente menor que o da deformação a frio [23]. Na conformação a quente são atingidas temperaturas mais elevadas, de 800 °C a 1200 °C. Devido à elevada energia térmica ocorrem neste caso processos de recristalização e crescimento de grão [26].

Na furação por escoamento uma ferramenta de geometria complexa atua num material que é aquecido e deformado gradativamente, à medida que o processo se desenvolve. Devido a esta característica do processo, a deformação do material é particularmente heterogênea. O material é portanto submetido a distintas taxas de deformação simultaneamente com diferentes temperaturas, cuja zona de influência se estende até uma certa região adjacente ao furo. Devido à presença destes gradientes de deformação e temperatura, diferentes fenômenos de transformações microestruturais, como transformações de fases, recuperação, recristalização e crescimento de grão podem ocorrer de forma simultânea na zona termomecanicamente afetada (ZTA) da bucha escoada.

Estas transformações microestruturais, como em outros processos de conformação, variam para cada material utilizado e dependem fortemente do estado inicial do material base. Como as condições de trabalho, o diâmetro da ferramenta e a espessura do material determinam os níveis de deformação e energia térmica aplicados durante o processo, estes parâmetros também influenciam as transformações metalúrgicas na furação por escoamento.

2.8.1

Conformabilidade de aços de baixo carbono

O aço é o material mais freqüentemente utilizado na furação por escoamento [20]. Do ponto de vista do material a ser trabalhado, a conformabilidade dos aços é determinada pela sua composição química, microestrutura e propriedades mecânicas (dureza, resistência) [24].

Na formação da microestrutura e portanto também para as propriedades mecânicas, as seguintes características dos aços possuem importância decisiva:

- Porcentagem de carbono ⇒ *Composição química*
- Presença de elementos de liga ⇒
- Tratamento térmico ⇒ *Transformação da microestrutura*

Considerando apenas a composição química em aços de baixa liga (porcentagem de elementos de liga < 5%), a porcentagem de carbono é o principal elemento responsável pela definição da microestrutura e com isso também pela determinação da dureza e resistência mecânica destes aços.

O termo “tratamento térmico” compreende o processo, durante o qual uma peça ou parte dela é exposta a seqüências controladas de temperatura-tempo, estando sujeita a efeitos físicos e químicos suplementares [25].

Através de determinados tratamentos térmicos pode-se modificar a microestrutura do material, no que diz respeito à forma, quantidade e distribuição dos seus microconstituintes. Com isso as propriedades mecânicas de uma material podem ser adequadas às exigências de conformabilidade [24].

Um fenômeno importante que ocorre com o aumento da temperatura refere-se a alteração no limite de escoamento do material. Para aços o aumento da temperatura leva inicialmente a um aumento do limite de escoamento, diminuindo a ductilidade, em temperaturas em torno de 200 °C a 400 °C, fenômeno denominado de “fragilidade azul” [23]. Acima desta faixa de temperatura o limite de escoamento em geral diminui consideravelmente.

2.8.2

O bandejamento em chapas laminadas

Na grande maioria das aplicações da furação por escoamento são utilizados produtos laminados, como chapas finas, cujas propriedades mecânicas permitem maior conformabilidade. Um exemplo de aço de baixo carbono é ilustrado na figura 23, onde pode ser observado o fenômeno do bandejamento.

O bandeamento é um fenômeno comum na conformação mecânica e trata-se de um alinhamento da ferrita e da perlita na direção de escoamento durante a deformação, representado pelas linhas alongadas na figura 23 [26].

A estrutura bandeada, em chapas de aço baixo carbono, ocorre principalmente pela segregação de Mn, que é favorecida pela baixa velocidade de resfriamento no centro das chapas durante a laminação. A presença de bandeamento nestes casos tem pouco ou nenhum efeito negativo nas propriedades dos materiais em serviço [26].

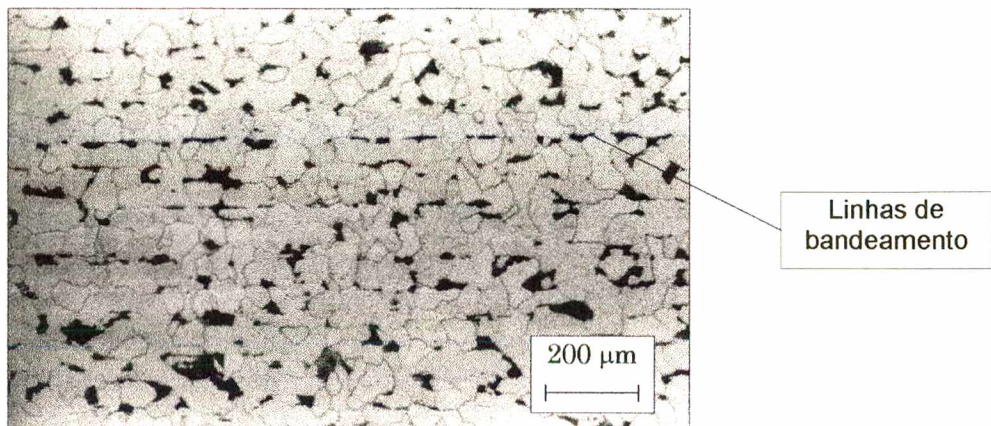


FIGURA 23 – Micrografia de aço recozido (0,12% C).

2.8.3

Recuperação, recristalização e crescimento de grão

Em processos de deformação a quente ou a morno de materiais metálicos ocorrem alterações microestruturais simultâneas como encruamento, recuperação, recristalização e crescimento de grão.

Durante o processo de deformação a frio é aplicada energia mecânica no material. A maior parte dela se transforma em calor e uma pequena parcela de energia residual permanece na peça, associada aos defeitos cristalinos gerados pela deformação. Este fenômeno eleva a resistência mecânica do material e é denominado de encruamento [27].

A recuperação se caracteriza pela restauração parcial das propriedades físicas/mecânicas do material, que foram alteradas pelo encruamento. Este fenômeno se caracteriza pela diminuição da dureza, como um estágio inicial de liberação da energia retida nos defeitos da rede cristalina, antes da recristalização [27]. A recuperação pode

continuar durante a recristalização, em regiões que ainda não tenham se transformado em novos cristais.

Quando a recuperação inicia-se durante a deformação ela é denominada de dinâmica, que se caracteriza basicamente pela movimentação de discordâncias. Em temperaturas mais elevadas, com o aumento da mobilidade de discordâncias, os efeitos da recuperação dinâmica são maiores [27].

A recristalização é uma transformação microestrutural mais intensa do que a recuperação, ocasionando no material uma situação de maior equilíbrio, através da formação de novos grãos pela elevação de temperatura [28]. O surgimento destes novos grãos a partir da microestrutura anterior é favorecido em pontos de alta energia de deformação do reticulado, como contornos de grão [27].

Durante o rearranjo da microestrutura na recristalização ocorrem interações entre grãos vizinhos, os quais mudam de forma e tamanho. Após a recristalização pode ocorrer crescimento de grão, onde os novos grãos, recristalizados, mudam de geometria tendendo a um arranjo de equilíbrio de tensões superficiais nos contornos de grão e de requisitos geométricos, para o total preenchimento do espaço que ocupam na microestrutura [28]. Em análise bidimensional, esta situação de equilíbrio corresponde a um arranjo geométrico, hipotético, com grãos hexagonais regulares, como ilustrado na figura 24.

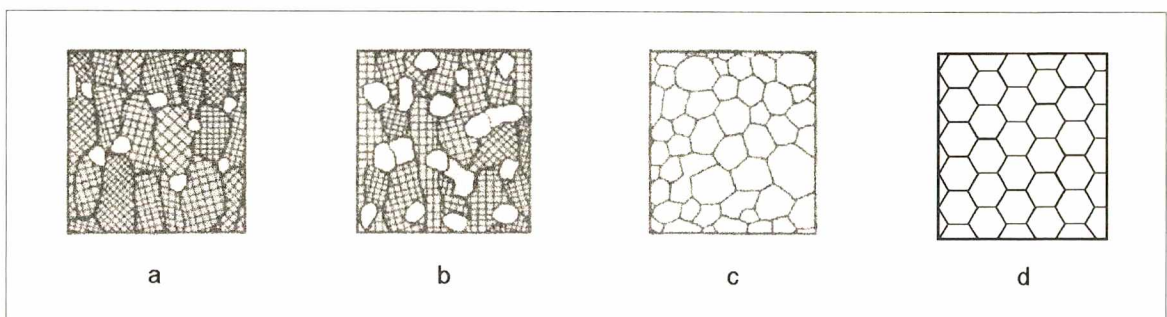


FIGURA 24 – Evolução do arranjo da microestrutura durante a recristalização [28].

(a) início da recristalização; (b) 50% de recristalização; (c) recristalização completa; (d) crescimento de grão teórico ideal “favos de mel”.

A partir do estado (c) inicia-se o crescimento de grão. A força motriz para esta alteração microestrutural é a energia superficial presente nos contornos de grãos recristalizados. Com o aumento do tamanho de grão acontece uma diminuição na energia superficial, levando a um estado de maior equilíbrio.

Assim como a recuperação, quando a recristalização inicia-se durante a deformação ela é denominada de dinâmica. A figura 25 mostra um material submetido a altas deformações a altas temperaturas, onde ocorre recristalização dinâmica, durante a deformação, e recristalização estática, após o processo.

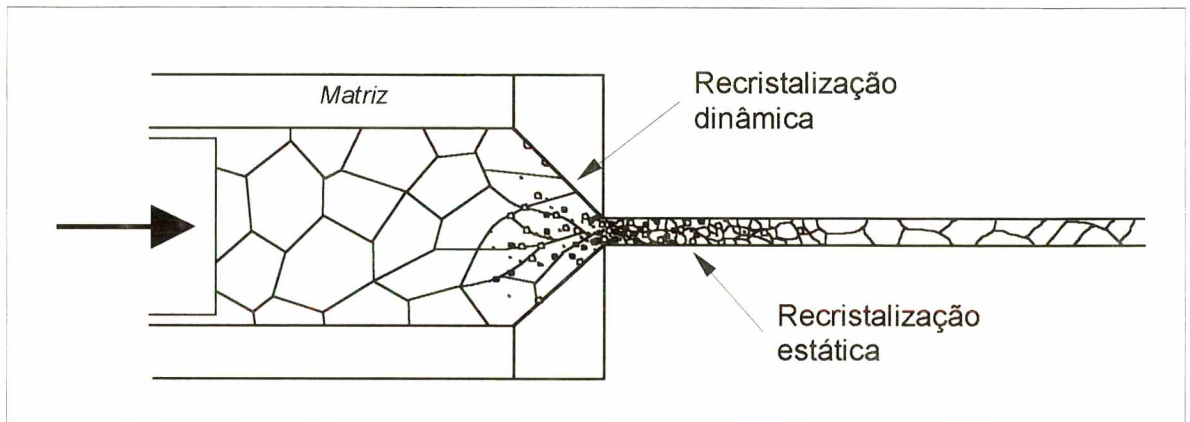


FIGURA 25 – Processos de recristalização estática e dinâmica na extrusão a quente [28].

Das sete leis da recristalização de Burke e Turnbull [28], podemos citar as duas mais relevantes, que melhor explicam a dependência da recristalização e do refino de grão em função da temperatura:

1. Quanto maior o grau de deformação, menor é a temperatura mínima para que ocorra recristalização.
2. O tamanho de grão final depende (fortemente) do grau de deformação e (fracamente) da temperatura.

Concluindo, quanto maior a deformação e/ou menor a temperatura, maior o refino de grão durante a recristalização.

A recristalização também depende fortemente da composição química do material. Em aços, quanto maior a porcentagem de carbono, menor a temperatura para que ocorra recristalização [28].

Na furação por escoamento, em função do gradiente de temperatura e da heterogeneidade de deformações geradas pelo processo, as transformações microestruturais

também ocorrem de forma heterogênea. Isto significa que, enquanto uma microrregião mais deformada estiver passando por um processo de recristalização, outra microrregião vizinha, menos deformada, pode estar sofrendo recuperação. Na faixa de temperatura da conformação a morno, ocorrência de recuperação significa amolecimento do material [23].

É desejável, como produto da furação por escoamento, uma microestrutura mais refinada. No processo posterior a furação por escoamento, o rosqueamento por conformação, uma microestrutura refinada leva à produção de roscas de melhor qualidade, pois a diminuição do tamanho de grão representa um aumento considerável da resistência mecânica do material, sem entretanto prejudicar as suas características de ductilidade [29].

Müller-Kraus em ensaios em DIN St 37 - aço com teor de carbono de $\sim 0,13\%$ - verificou pouca ou nenhuma recristalização na região de maior deformação, devido provavelmente a baixas taxas de deformação e temperaturas, correlacionadas à baixa velocidade de avanço e rotação, respectivamente [1].

Já em ensaios metalográficos realizados no material S275JOH [10] - aço de baixo carbono laminado a quente - foram encontrados outros produtos de transformações metalúrgicas. Na região mais deformada houve evidências de que o material sofreu parcialmente um processo de reaustenitização e de transformação bainítica, sugerindo um aquecimento por volta de 800°C , devido ao uso de rotações mais elevadas [10].

2.8.4

Refino de grão durante a conformação mecânica

Em processos de conformação realizados acima da temperatura de recristalização T_R , que para o aço de baixo carbono é da ordem de 600°C , ocorre o fenômeno do refino de grão. Nesta temperatura o material se encontra num estado de grande plasticidade e pode ser conformado em formas diversas [30]. Durante a conformação nesta faixa de temperatura a microestrutura do material é modificada de forma considerável.

Usualmente nestes processos a peça é fabricada em vários passes, durante os quais alternam-se a deformação plástica da estrutura com a recristalização após a deformação, resultando numa microestrutura extremamente refinada.

As circunstâncias em que este refino de grão acontece durante a deformação nesta faixa de temperatura estão ilustradas de forma esquemática na figura 26.

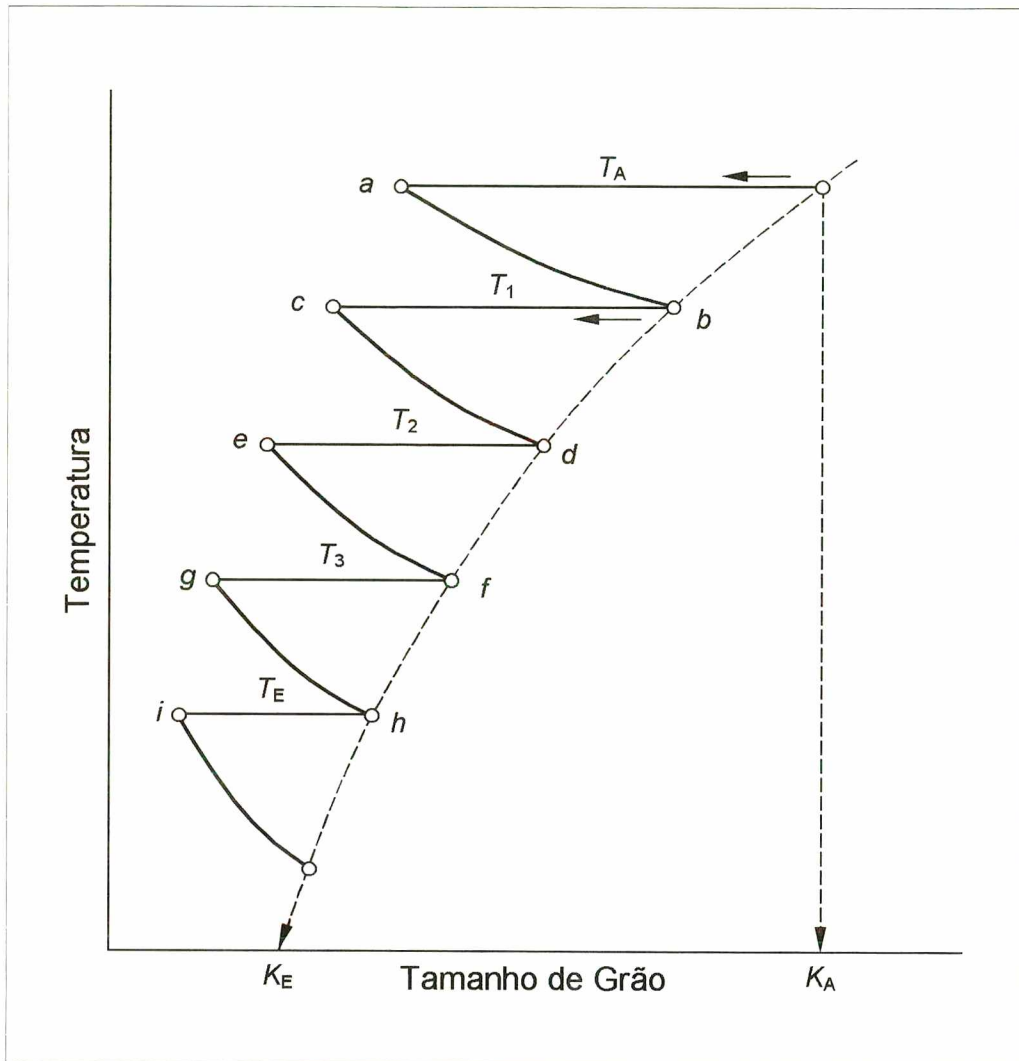


FIGURA 26 - Representação esquemática do mecanismo de refino de grão na conformação a morno. K_A = tamanho de grão inicial. K_E = tamanho de grão final [30].

Suponha-se que o material levado à temperatura de início de deformação T_A possua um tamanho de grão médio K_A . No primeiro passe (1) os grãos são intensamente deformados e sofrem um refino de grão. O tamanho de grão diminui e é da ordem de a . Através da recristalização, entre o 1° e 2° passe, os grãos crescem rapidamente devido à temperatura relativamente alta, alcançando o tamanho de grão b . Ao mesmo tempo a temperatura diminui para T_1 . No passe seguinte ocorre novamente o refino de grão de $b \rightarrow c$. Entre o 2° e 3° passe a microestrutura deformada recristaliza-se novamente, alcançando o tamanho de grão d . Este tamanho de grão é menor que o do passe anterior, devido à temperatura de recristalização mais baixa, isto é, $d < b$.

Durante o restante do processo a temperatura diminui continuamente e o tamanho de grão é reduzido de f para h , até que na temperatura de deformação final T_E é alcançado o tamanho de grão K_E .

Da ilustração anterior nota-se que o tamanho de grão final K_E depende da temperatura de deformação final T_E . Quanto mais baixa for esta temperatura, menor é o tamanho de grão final e vice-versa.

Portanto, caso o último passe não tivesse sido realizado na temperatura T_E e sim na T_3 , por exemplo, o tamanho de grão resultante seria h , onde $h > K_E$ [30].

2.8.5

Fator de forma

Na análise microestrutural bidimensional de um material conformado, o fator de forma dos grãos da microestrutura pode ser utilizado como um parâmetro na determinação de recristalização. Se a distribuição dos valores do fator de forma dos grãos possuir valor médio próximo do valor do fator de forma de grãos equiaxiais, na faixa de 0,7-0,9, pode-se afirmar que houve recristalização [28].

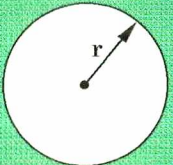
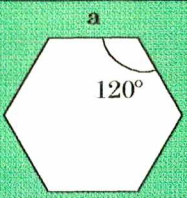
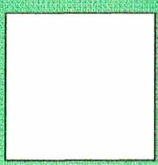
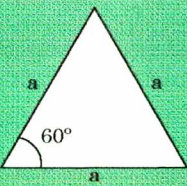
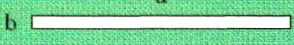
O fator de forma é uma variável que relaciona a forma de uma figura geométrica bidimensional qualquer com a forma de um círculo. O valor máximo do fator de forma é igual a 1, que é o valor do círculo. Tanto mais complexa ou menos circular for a geometria de uma figura qualquer, menor em relação a 1 é o seu fator de forma. Esta variável depende da área (A) e do perímetro (P) da figura e é calculada pela equação 12 [31].

$$S = 4 \cdot \pi \cdot \frac{\text{ÁREA}}{\text{PERÍMETRO}^2} \quad (12)$$

Na tabela 2 são apresentadas algumas figuras geométricas e seus respectivos fatores de forma.

O fator de forma de um grão recristalizado, após o crescimento de grão, é teoricamente igual a 0,907, de acordo com o quadro abaixo. Em torno deste valor deve estar localizada a distribuição do fator de forma de um microestrutura recristalizada, cujos grãos após o crescimento tendem a um arranjo geométrico de “favos de mel”.

TABELA 2 – Figuras geométricas e seus respectivos fatores de forma [32].

Figura	Representação	Fórmulas	Fator de forma s
Círculo		$A = \pi \cdot r^2$ $P = 2 \cdot \pi \cdot r$	1
Hexágono Regular		$A = \frac{3}{2} \cdot a^2 \cdot \sqrt{3}$ $P = 6 \cdot a$	0,907
Quadrado		$A = a^2$ $P = 4 \cdot a$	0,785
Triângulo Equilátero		$A = \frac{a^2}{4} \sqrt{3}$ $P = 3 \cdot a$	0,604
Bastão $a \gg b$		$A = a \cdot b$ $P = 2 \cdot a + 2 \cdot b$	$\sim 0,3$

2.8.6

Taxa de deformação

Em função dos diferentes gradientes de temperatura e taxas de deformação presentes durante a furação por escoamento, a análise da intensidade de deformação do material na ZTA é dificultada.

Para a compreensão da intensidade de deformação sofrida por um material faz-se necessária a diferenciação básica entre velocidade de deformação e taxa de deformação [33]. Tomando-se duas barras A e B de comprimento inicial 50 mm e 20 mm, tracionando-as a uma velocidade de deformação de 10 mm/s, após 1 segundo as mesmas terão o comprimento final de 60 mm e 30 mm, respectivamente, como ilustrado na figura 27.

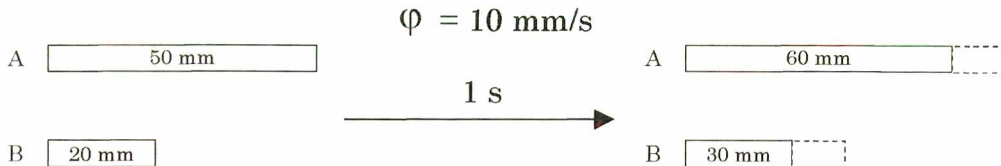


FIGURA 27 – Comparação entre diferentes taxas de deformação.

A taxa de deformação [s^{-1}] para as amostras acima pode então ser calculada pela equação 13 [33].

$$\dot{\varphi} = \frac{\Delta \ell / \ell_o}{\Delta t} \quad (13)$$

$$A = \frac{10/50}{1} = 0,2 \text{ s}^{-1} \quad B = \frac{10/20}{1} = 0,5 \text{ s}^{-1}$$

Embora tenham sido deformadas a mesma velocidade, a amostra B sofreu um grau de deformação 2,5 vezes maior que a amostra A. Portanto, o conceito de taxa de deformação descreve melhor a intensidade de deformação sofrida pelo material.

Analisando a equação 13, pode-se perceber que a taxa de deformação depende também do tempo (Δt) necessário à conformação, que depende diretamente da velocidade de deformação.

Na furação por escoamento, a velocidade de deformação depende diretamente da velocidade de avanço que, conforme citado anteriormente [14], determina o tempo disponível para a conformação. Portanto, quanto maior a velocidade de avanço, maior a velocidade de deformação e portanto maiores as taxas de deformação presentes na ZTA da bucha escoada.

2.8.7 Microdureza

Um instrumento importante para a análise das transformações metalúrgicas é a medição de dureza na zona termomecanicamente afetada. A medida de dureza é provavelmente a técnica mais utilizada em metalurgia, em função da facilidade e rapidez de realização [28].

Em trabalhos científicos, entretanto, é preferível utilizar as medidas de microdureza, por duas razões principais: (i) as medições de microdureza Vickers cobrem toda a faixa de valores de dureza dos materiais; (ii) permitem a medição de microdureza em fases individuais em materiais polifásicos, desde que o tamanho destas fases seja suficiente para acomodar as indentações [28].

Na observação de certas transformações microestruturais, como recuperação e recristalização, a utilização de microdureza é recomendada. Por exemplo, se a amostra possuir estrutura parcialmente recristalizada, a medição de dureza representará a média das regiões recristalizadas e não recristalizadas da amostra. Com a medição de microdureza este problema pode ser contornado, medindo a microdureza das áreas não recristalizadas (recuperadas) e recristalizadas [28].

Na furação por escoamento a medição de microdureza pode indicar variações de resistência mecânica na ZTA, que poderão afetar a resistência à tração da bucha roscada.

Na região deformada da bucha escoada, a microdureza varia em função da distância à borda do furo, como mostrado na figura 28, para um aço baixo carbono DIN St 37 [1].

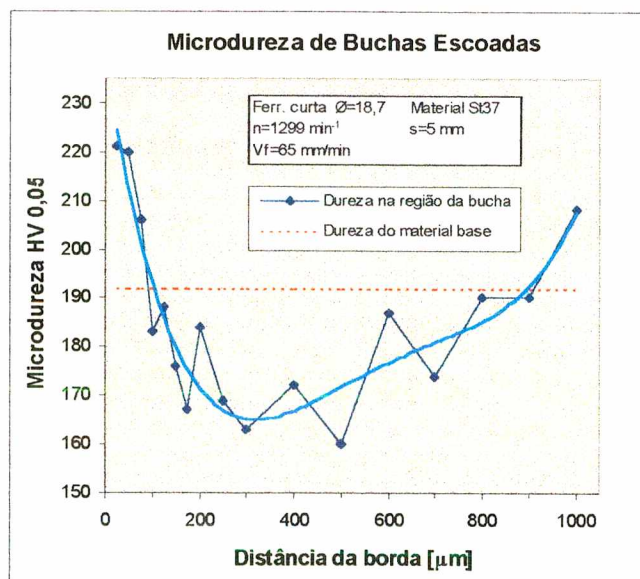


FIGURA 28 - Medições de microdureza na região da borda da bucha [1].

As medições plotadas na curva da figura 28 foram realizadas seguindo uma linha reta da borda da bucha - região de maior deformação - em direção ao material base.

Basicamente pode-se observar dois fenômenos pela medição de microdureza: (i) um endurecimento de até 30% na região mais deformada, devido provavelmente ao refino de grão decorrente da recristalização [1]; (ii) a diminuição da resistência mecânica do material próximo à borda do furo, onde pode ter ocorrido recuperação.

2.8.8

Técnica do material recozido

Mais recentemente foi desenvolvida uma técnica visual de análise metalográfica do material na furação por escoamento [34]. Embora apresentem propriedades diferentes daquelas anteriores ao tratamento térmico, amostras produzidas em material recozido, cuja microestrutura mais homogênea, composta de grãos maiores, permitem uma melhor visualização da deformação sofrida pelo material e da influência termomecânica devido ao processo.

Para exemplificar a técnica é apresentada na figura 29 uma micrografia de uma bucha escoada em aço SAE 1020, recozido a 900°C por 6 horas [34]. Como resultado do recozimento tem-se uma estrutura bandeada, além de crescimento de grão, que aparece nas ampliações 4 e 5, na região de material base.

As micrografias 1, 2 e 3 ilustram as regiões de deformação da bucha. A ampliação 1 da área de transição mostra o gradiente de deformação entre a região mais externa, da interface ferramenta-peça, e a região mais próxima ao material base. Nesta ilustração pode-se perceber a dispersão da perlita na fase ferrítica, decorrente da grande deformação ocorrida nesta região.

Na ampliação 2 pode-se notar o refino de grão na microestrutura. A presença de alguns grãos equiaxiais sugere um princípio de ocorrência de recristalização. Esta recristalização deve ter sido em função das altas temperaturas alcançadas e pela deformação imposta pelo processo. A ampliação 3, mais abaixo, sugere uma ocorrência mais forte de recristalização. O desaparecimento quase total da estrutura bandeada do material base é mais visível nesta micrografia.

Outro aspecto importante é a distribuição do escoamento do material na direção axial, de penetração da ferramenta. Nesta amostra, aproximadamente 70% do material escoou para a superfície inferior da chapa, o restante 30% para a superfície superior [34].

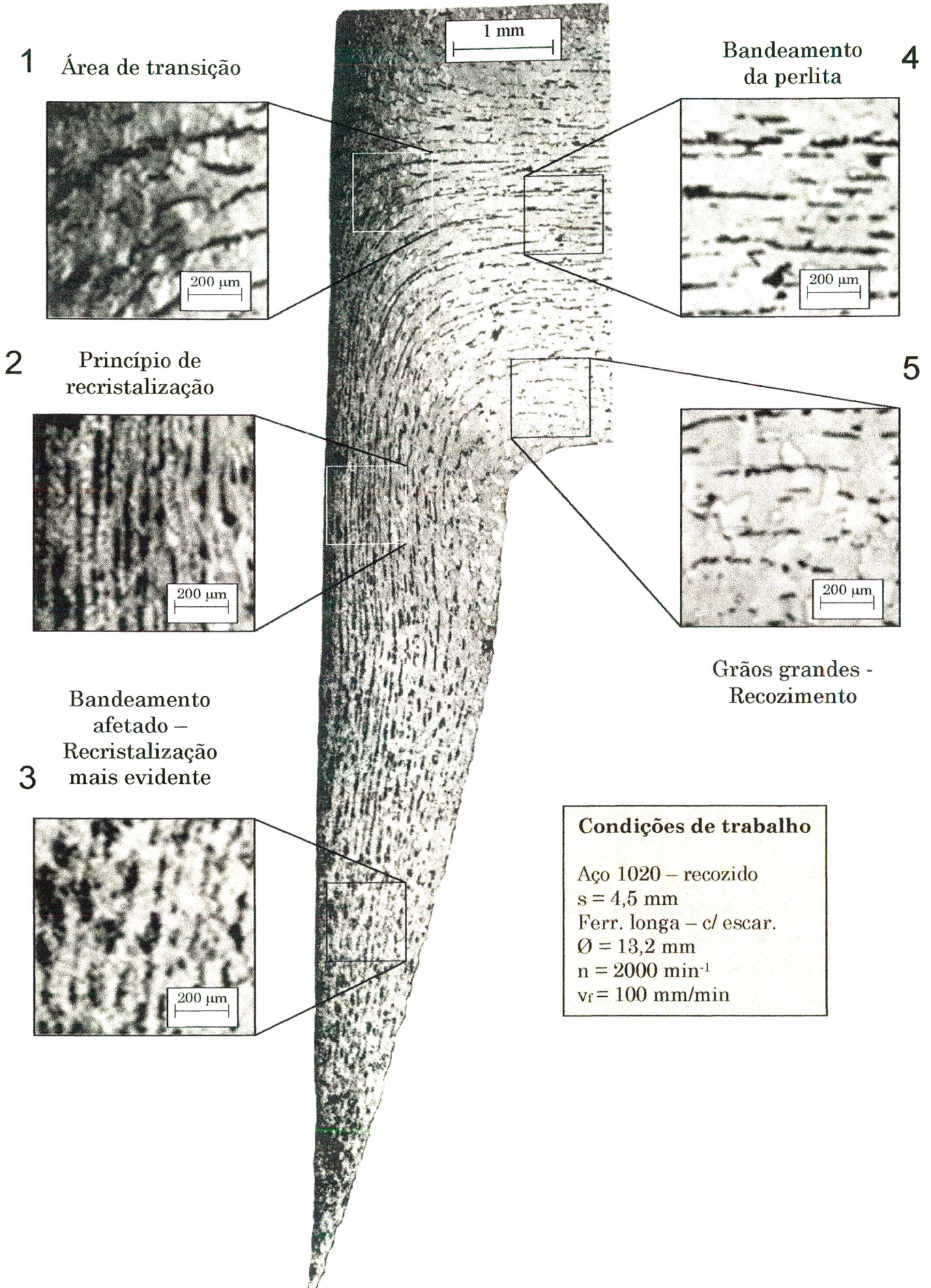


FIGURA 29 – Micrografia de bucha com v_f constante de 100 mm/min.

2.9 Rosqueamento por Conformação

Este é o processo posterior à furação por escoamento, necessário à produção da rosca nas buchas escoadas.

O início das pesquisas envolvendo rosqueamento interno sem geração de cavacos ocorreu antes dos anos 40, mas o primeiro projeto de macho de conformação que teve sucesso data de meados dos anos 50 [3].

A idéia de fabricar roscas internas por conformação ao invés de serem produzidas por usinagem, sempre teve grandes atrativos. A ausência de cavacos, que conseqüentemente eliminava a preocupação com sua retirada do local de trabalho, era uma das grandes vantagens vislumbradas. Outras vantagens são citadas na tabela 3.

TABELA 3 – Vantagens do rosqueamento por conformação [9].

- 😊 **Aumento da resistência da rosca devido ao encruamento**
- 😊 **Maiores velocidades de conformação da rosca**
- 😊 **Boa qualidade superficial dos filetes**
- 😊 **Longa vida da ferramenta**

No rosqueamento por conformação, a rosca é formada pelo deslocamento radial do material da peça entre as cristas da rosca do macho em rotação, como ilustrado na figura 30. As superfícies produzidas nos filetes são análogas às aquelas produzidas por processos de forjamento, laminação e trefilação externa de roscas.

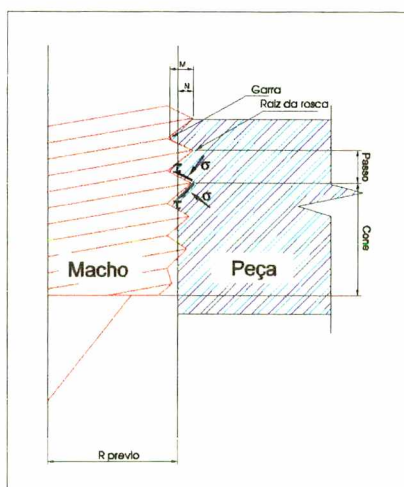


FIGURA 30 - Formação dos filetes no rosqueamento por conformação [3].

A ferramenta utilizada no processo de rosqueamento por conformação, como mostrado na figura 31, possui uma geometria que permite suportar os altos momentos torçores requeridos para a fabricação das roscas, além de ser menos sensível a variações de dimensão e qualidade do furo inicial.

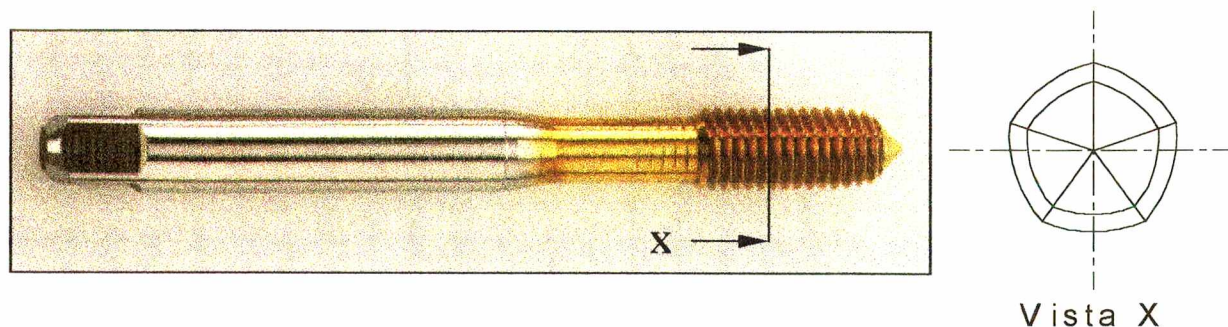


FIGURA 31 - Macho de conformação, segundo o fabricante Zecha [19].

O macho de conformação é fabricado em aço rápido e possui uma ponta cônica que abrange de 2 a 4 filetes, sendo estes menores que o diâmetro efetivo do macho. São estes filetes os responsáveis pelo trabalho de deslocamento inicial do material e por guiar a ferramenta.

A conformação ocorre nas rampas precedentes das cristas dos filetes dos machos (lóbulos), diminuindo a probabilidade de ocorrência de arrancamento de pequenos cavacos de material (*galling*) [3].

O rosqueamento por conformação é particularmente vantajoso para a produção de roscas em buchas escoadas, devido à não-remoção de material, que diminuiria sensivelmente a resistência à tração da bucha roscada.

3 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo principal deste trabalho é a análise comparativa entre o uso convencional das condições de trabalho na furação por escoamento - rotação e velocidade de avanço constantes - e a utilização de rotação e velocidade de avanço variável em processo, com ênfase na análise das transformações microestruturais do material da bucha.

Em decorrência da tecnologia de furação por escoamento ter a sua maior aplicação na faixa da rosca M8, em aços baixo carbono, neste trabalho o estudo será restringido à ferramentas de furação de 7,3 mm de diâmetro e machos de conformação no aço SAE 1012.

Inicialmente objetiva-se determinar as implicações do uso da alteração das condições de trabalho nas variáveis de processo, no que diz respeito a solicitações na ferramenta e exigências da máquina-ferramenta em termos de potência de acionamento.

Pretende-se também avaliar a influência das condições de trabalho variáveis na qualidade e na geometria das buchas escoadas.

Com o objetivo de analisar as alterações microestruturais, a introdução de energia termomecânica no processo deverá ser abordada, através do estudo do trabalho de deformação e da temperatura.

Na análise microestrutural pretende-se fazer uma correlação entre o trabalho termomecânico realizado durante o processo com a observação das transformações microestruturais, através de microscopia óptica e eletrônica de varredura. Para tanto faz-se necessária também a medição de microdureza na região deformada, determinando as alterações na resistência mecânica do material. Neste aspecto deverá ser desenvolvido um estudo quantitativo dos fenômenos de recristalização e refino de grão.

O uso da técnica do material recozido, como ferramenta de análise da influência termomecânica no material, deverá ser avaliado.

Como objetivo final do trabalho será desenvolvida uma análise comparativa da resistência mecânica de buchas roscadas, através de ensaios de resistência à tração segundo a norma DIN 267/4 [22]. Estes experimentos objetivam determinar também a classe de resistência das buchas roscadas, fornecendo informações validadas para o projeto de fixações roscadas em chapas finas.

4 METODOLOGIA DE ENSAIO

A análise do processo de furação por escoamento desenvolvida neste trabalho, que trata do estudo da influência das condições de trabalho alteradas durante o processo, é dividida basicamente em duas áreas:

- Análise desta influência sobre as características de processo;
- Estudo dos resultados de trabalho com ênfase na análise microestrutural.

No âmbito geral, o estudo do processo com condições de trabalho variáveis - rotação e velocidade de avanço - concentrou-se na análise comparativa de amostras produzidas com condições de trabalho mantidas constantes em processo.

No estudo das características “*in-process*” foram abordadas as grandezas mais relevantes ao trabalho desenvolvido. Do ponto de vista de processo e solicitações na máquina-ferramenta, foram investigadas a força de avanço, o momento torçor e a potência mínima consumida. A partir destes resultados foi obtido o trabalho de conformação, informando sobre a quantidade de energia mecânica introduzida no processo de conformação da bucha. Como ferramenta para a análise microestrutural posterior, também foi medida a temperatura em processo.

Na análise dos resultados de trabalho foram abordadas inicialmente a qualidade da rebarba e a geometria da bucha. O estudo das transformações microestruturais no material da peça, devido ao trabalho termomecânico do processo, foi realizado através de microscopia óptica e eletrônica (MEV) da região deformada. A análise da deformação da bucha, a medição de microdureza e o estudo através da técnica do material recozido também contribuíram para esta análise.

Após a avaliação da influência das condições de trabalho na microestrutura, partiu-se para o estudo da resistência mecânica resultante da bucha roscada, através de ensaios de resistência à tração.

Uma visão geral da análise do processo de furação por escoamento desenvolvido neste trabalho é apresentada na figura 32. Neste fluxograma as diversas grandezas medidas e analisadas são organizadas em grupos (entrada, processo, resultados), segundo a seqüência de estudo desenvolvida neste trabalho.

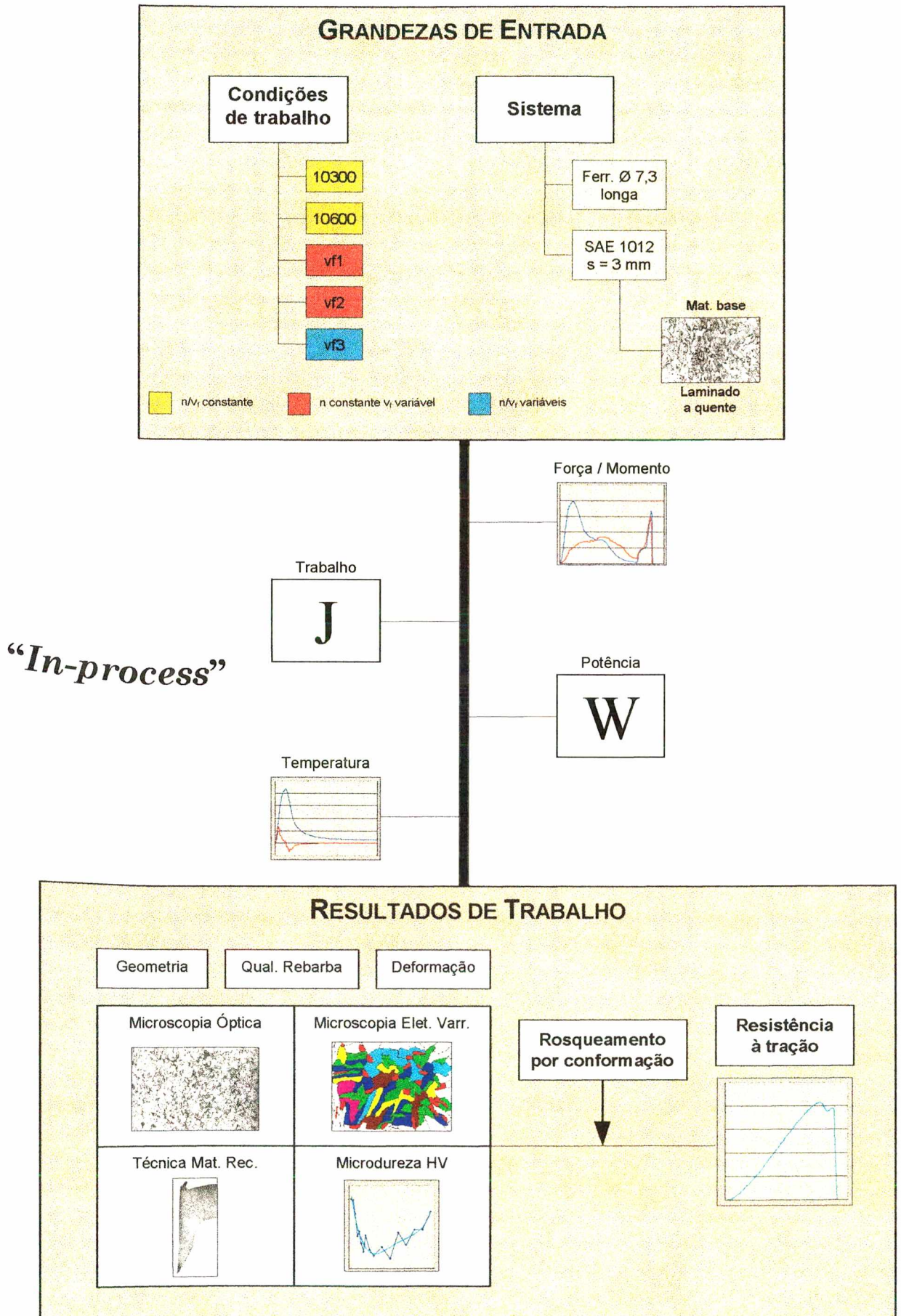


FIGURA 32 - Fluxograma do desenvolvimento do trabalho.

5 MÉTODO EXPERIMENTAL

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram selecionadas 5 condições de amostras distintas: duas condições com rotação e v_f constantes (10300 e 10600), duas condições com rotação constante e v_f variável (v_{f1} e v_{f2}) e uma terceira situação (v_{f3}), onde a rotação e a velocidade de avanço foram variadas durante a execução do processo.

As condições 10300 ($v_f = 100$ mm/min e $n = 3000$ min⁻¹) e 10600 ($v_f = 100$ mm/min e $n = 6000$ min⁻¹) foram especificadas a partir de valores usualmente utilizados como parâmetros de entrada na furação por escoamento [1,14]. Com estas condições pretende-se verificar a influência da rotação com o uso de velocidade de avanço constante.

A influência do uso da velocidade de avanço variável será estudada na análise comparativa de amostras do primeiro grupo com amostras do segundo, em duas situações distintas: (i) média rotação de 3000 min⁻¹ (10300, v_{f1}) para média introdução de energia térmica; (ii) alta rotação de 6000 min⁻¹ (10600, v_{f2}) para alta introdução de energia térmica [1].

Com o terceiro tipo de condição (v_{f3}) pretende-se avaliar um caso à parte, no qual rotação variável em processo também foi utilizada. Nesta condição é utilizada a rotação $n = 6000$ min⁻¹ no início do processo, com intensa introdução de energia, e a rotação $n = 3000$ min⁻¹ no restante da execução da bucha.

Em todos os ensaios foram utilizadas chapas de aço SAE 1012 de 3,0 mm de espessura, laminadas a quente, fornecidas pela Companhia Siderúrgica Paulista. Para os ensaios é utilizada uma ferramenta longa com colar, de 7,3 mm de diâmetro.

O método de variação da velocidade de avanço em processo foi o mesmo utilizado por Heiler [14]. Este considera os pontos $F_{f_{máx}}$ e F_{f_1} nas curvas de força de avanço como referência para a mudança de velocidade de avanço em processo. Do mesmo modo, para a definição destes pontos também optou-se pela descrição das fases do processo efetuada por Heiler [14].

A partir destes pontos são calculadas as diferentes profundidades de penetração da ferramenta, onde a velocidade de avanço e a rotação devem ser modificadas. Para a medição de força de avanço e momento torçor foram utilizados sensores piezelétricos [3].

A potência de acionamento requerida para a conformação da bucha foi calculada a partir do valor máximo de momento torçor $M_{t_{máx}}$. O cálculo do trabalho de conformação foi

efetuado através de integração pelo método do somatório de Riemann [35], cuja equação (15) é apresentada no anexo 12.9.

A temperatura foi medida empregando-se a técnica de medição direta por termopares, que possibilita a aquisição de dados de temperatura na superfície externa da parede da bucha. Os termopares foram fixados na chapa através de solda ponto, sem a realização de furos, a fim de que a influência da fixação do termopar fosse minimizada.

Para a medição da geometria da bucha e avaliação da qualidade da rebarba foi utilizada medição óptica diferencial. A classificação da qualidade das rebarbas utilizada foi a mesma desenvolvida por Heiler [14], a qual foi adaptada a partir de estudos realizados por Lopes [3] e apresentada de forma mais otimizada, com modificações na profundidade de ruptura máxima admissível de cada grupo de qualidade.

O estudo das transformações microestruturais foi o escopo principal na análise dos resultados de trabalho. Este estudo foi introduzido pela avaliação qualitativa por microscopia óptica das transformações microestruturais nas amostras em material. Com a utilização de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi desenvolvida a análise quantitativa destas amostras, através de tratamento computacional de micrografias de regiões da bucha escoada, onde o fenômeno de recristalização foi particularmente analisado. A análise de micrografias foi concluída pela técnica do material recozido [34], a qual baseou-se na avaliação visual da influência térmica em micrografias obtidas por microscopia óptica. A medição de microdureza Vickers, com abrangência bidimensional da região deformada, complementou a análise microestrutural.

A medição da resistência à tração das buchas roscadas baseou-se na determinação da carga de resistência máxima de cada amostra e na determinação das classes de resistência correspondentes. Com estes ensaios pretendeu-se avaliar a capacidade de carga da bucha roscada como um todo.

6 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

6.1 Condições de Ensaio

Na tabela 4 são apresentados os valores de rotação (n) e velocidade de avanço (v_f) dos ensaios de furação por escoamento para as amostras analisadas: 10300, 10600, vf1, vf2 e vf3. Para o rosqueamento das buchas foi utilizada a rotação de 300 min^{-1} .

TABELA 4 - Condições de trabalho para as amostras.

Amostra	Profundidade [mm]	Rotação n [min^{-1}]	v_f [mm/min]
10300	0 – 17,8	3000	100
10600	0 – 17,8	6000	100
vf1	0 – 2,83	3000	100
	2,83 – 15		1000
	15 – 17,8		100
vf2	0 – 2,67	6000	100
	2,67 – 15		1000
	15 – 17,8		100
vf3	0 – 2	6000	100
	2 – 2,67	3000	1000
	2,67 – 15		100
	15 – 18		100

6.2 Ferramentas

Para todos os ensaios de furação por escoamento foi utilizada uma ferramenta tipo longa sem escareador, de diâmetro 7,3 mm, adequada para o rosqueamento da rosca métrica normal M8.

Esta ferramenta, assim como o macho de conformação M8 utilizado para a produção das buchas roscadas, foi fornecida pela empresa Flowdrill B.V. da Holanda.

6.3 Lubrificante

Nos ensaios de furação por escoamento, a ferramenta foi untada com o lubrificante sólido FdKS, em forma de pasta, para a produção de cada bucha. Esta pasta, a base de sulfeto de zinco [3], possui capacidade de lubrificação a temperaturas elevadas. Para o rosqueamento das buchas escoadas foi utilizado o lubrificante oleoso FtMA, com aditivos de extrema pressão (EP). Os lubrificantes foram fornecidos pela empresa Flowdrill B.V.

6.4 Infraestrutura de Ensaios

6.4.1 Ensaios para medição de Ff e Mt

Máquina-ferramenta

Os ensaios de furação e rosqueamento foram realizados em uma fresadora CNC, marca Romi, modelo Polaris F400. As suas características são apresentadas no anexo 12.1.

Plataforma piezométrica

Este equipamento, fabricado pela empresa Kistler Instruments AG, modelo 9273, foi utilizado na medição da força de avanço e do momento torçor durante o processo. As características principais deste equipamento estão listadas no anexo 12.2.

Sistema de aquisição de dados de força de avanço e momento torçor

Para a aquisição, tratamento dos sinais e armazenamento dos dados enviados pela plataforma piezométrica foi necessária a montagem de um conjunto de equipamentos, que compunham a bancada de ensaios, como ilustrado na figura 33.

Detalhes sobre o funcionamento do sistema de aquisição e tratamento de dados são mostrados no anexo 12.3.

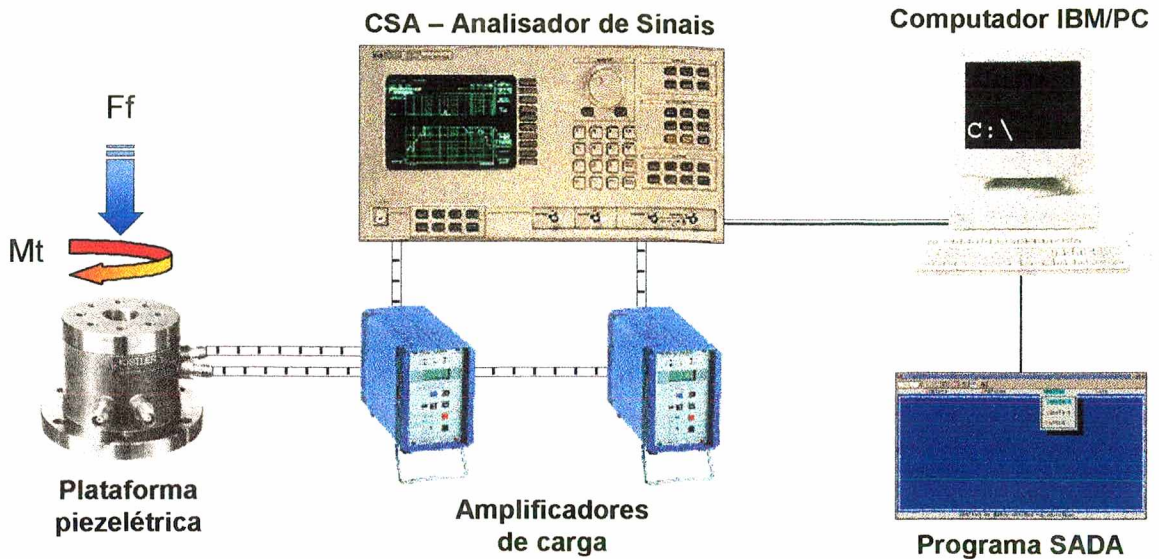


FIGURA 33 - Representação esquemática da bancada de ensaios para a medição de força de avanço e momento torçor.

Corpos de prova

Os corpos de prova para os ensaios de F_f e M_t foram confeccionados em chapas de aço SAE 1012 de 3,0 mm de espessura, laminado a quente, fabricado pela siderúrgica COSIPA. As principais propriedades mecânicas deste material, colhidas da norma SAE, bem como a sua composição química, fornecidas pela firma COSIPA, são apresentados no anexo 12.4.

A geometria dos corpos de prova foi definida em função do dispositivo de fixação utilizado para os ensaios e da disposição e número mínimo de furos produzidos em cada corpo de prova, como ilustrado na figura 34.

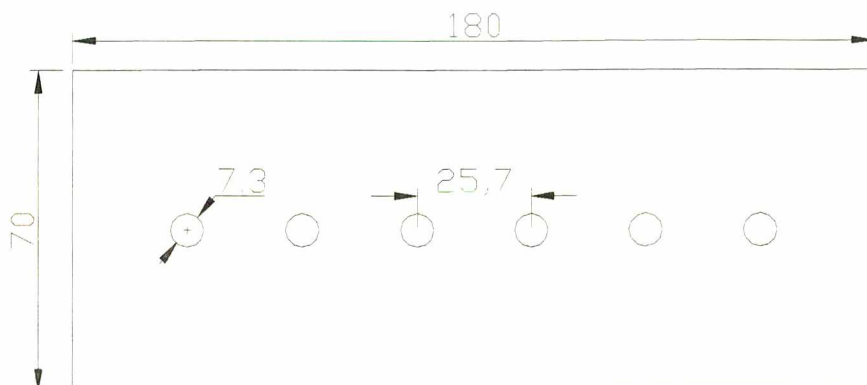


FIGURA 34 - Geometria dos corpos de prova.

Dispositivo de fixação dos corpos de prova

Na figura 35 é mostrado o esquema de montagem do dispositivo de fixação e da plataforma piezelétrica para os ensaios de furação e rosqueamento.

O dispositivo de fixação ① é montado sobre a plataforma piezelétrica ②, que é fixada sobre uma base metálica ③, a qual é mantida fixa na mesa da máquina-ferramenta. Os corpos de prova ④ são fixados ao dispositivo através de grampos ⑤. Sobre a plataforma é montada uma capa metálica ⑥, que serve de proteção contra cavacos e fluidos de corte.

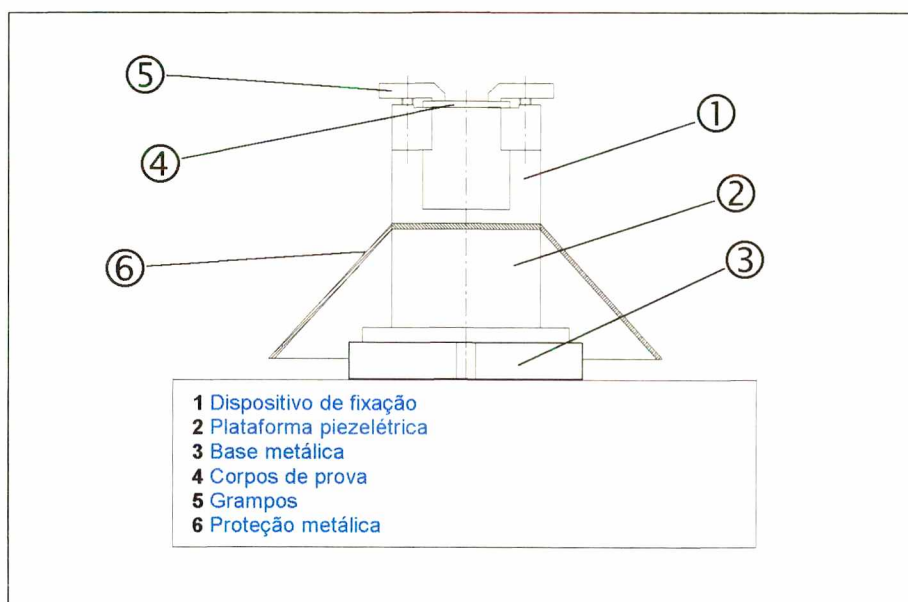


FIGURA 35 - Esquema de montagem do dispositivo de fixação [36].

6.4.2

Ensaio para medição de temperatura

Máquina-ferramenta

Nesta série de ensaios foi utilizada a mesma máquina-ferramenta dos ensaios de medição de força de avanço e momento torçor (item 6.4.1).

Sistema de aquisição de dados de temperatura

A bancada de ensaios para medição de temperatura foi composta por termopares, micro-voltímetro e microcomputador, ilustrados na figura 36. Detalhes do funcionamento do sistema se encontram no anexo 12.5.

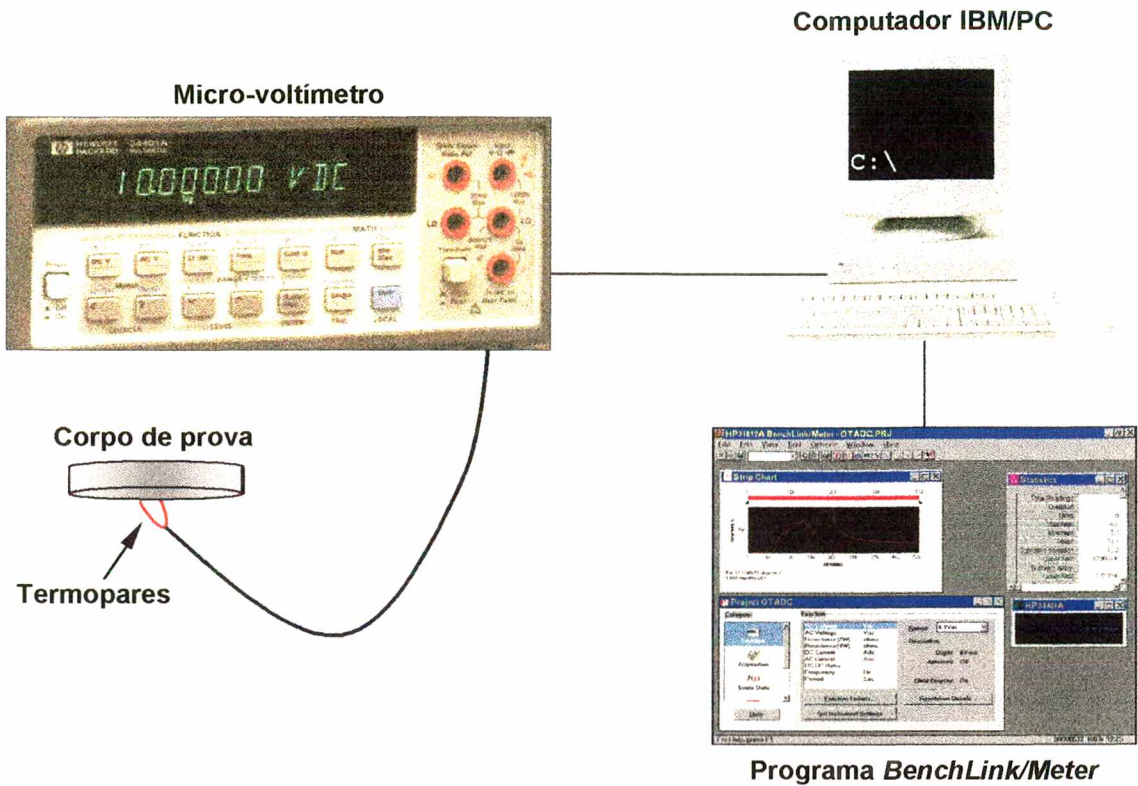


FIGURA 36 - Bancada de equipamentos para medição de temperatura.

Corpos de prova

Para os ensaios de medição de temperatura foram utilizados corpos de prova de formato circular, como apresentado na figura 37, do mesmo material e espessura de chapa dos experimentos para medição dos esforços na ferramenta.

Com este formato a influência da geometria do corpo de prova é minimizada, fazendo com que a condução de calor seja radialmente uniforme durante o ensaio.

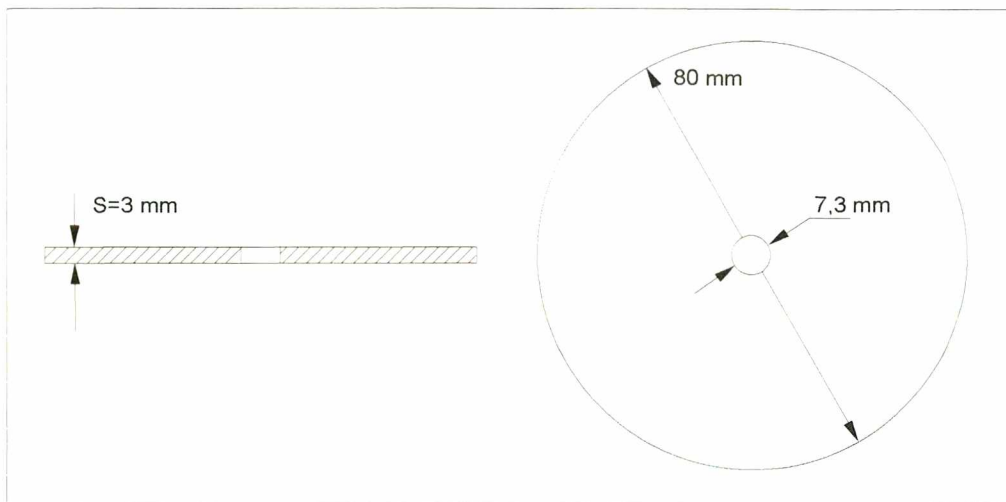


FIGURA 37 - Geometria dos corpos de prova para a medição de temperatura.

Termopares

Para os experimentos foram utilizados termopares do tipo K, que são recomendados para a faixa de trabalho de -100°C a 1200°C , comercializados pela firma Ecil S.A.

Os termopares foram fixados no corpo de prova através de solda-ponto, como ilustrado em detalhe na figura 38.

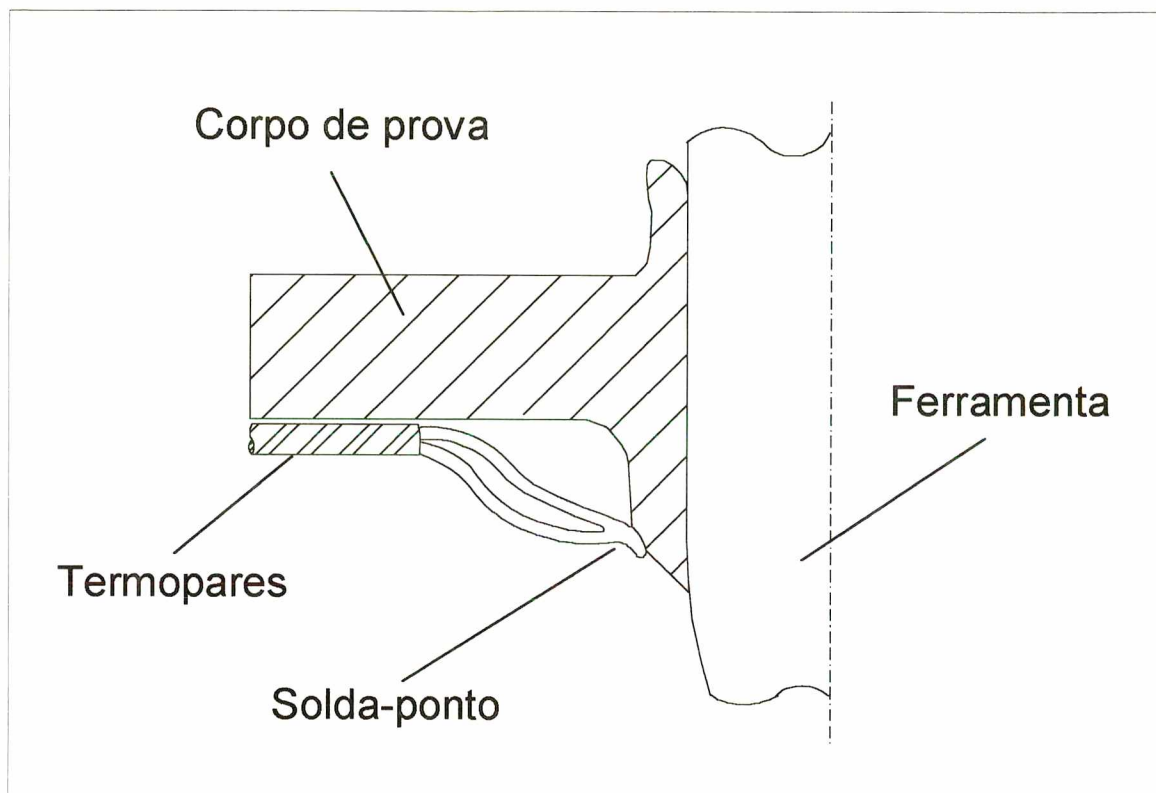


FIGURA 38 – Detalhe da fixação dos termopares no corpo de prova.

Dispositivo de fixação dos corpos de prova

Este dispositivo de fixação é semelhante ao utilizado para os ensaios de força de avanço e momento torçor. A parte superior, fabricada em madeira, foi projetada de modo a minimizar a sua influência na medição de temperatura, mantendo o corpo de prova melhor isolado das partes metálicas restantes do dispositivo. Deste modo a transferência de calor para fora do corpo de prova é reduzida, podendo ser considerado um processo adiabático. Manter o ciclo térmico do material mais constante durante os experimentos tem como objetivo melhorar a repetibilidade dos ensaios. O desenho deste dispositivo se encontra no anexo 12.6.

6.5

Medição das Dimensões Principais e Avaliação da Qualidade da Rebarba

Para a medição do comprimento da bucha ℓ e da espessura de parede e_p das amostras foi utilizado um microscópio universal Leitz-Strasman, cujas características se encontram no anexo 12.7, através da técnica de medição óptica diferencial.

Este mesmo equipamento foi utilizado para a medição da porcentagem δ do comprimento total ℓ da bucha atingida pela ruptura, determinando deste modo a classe de qualidade da rebarba de cada amostra.

6.6

Análise Metalográfica

6.6.1

Preparação de amostras

A preparação das amostras para a microscopia óptica e eletrônica de varredura seguiu os procedimentos de rotina para corpos de prova de aço baixo carbono. Após o embutimento em baquelite, foi conduzida a operação de lixamento com lixas de SiC comerciais até 600 mesh, e polimento com meio abrasivo à base de pasta de diamante de 1 μm . O ataque das superfícies das amostras foi feito com nital 2%. O tempo de ataque variou de amostra para amostra, segundo os diferentes níveis de deformação.

6.6.2

Técnica do material recozido

Para a análise através desta técnica foi necessário o recozimento do material utilizado para as amostras nesta série de ensaios. Para tal processo foi utilizado um forno tipo mufla, cuja temperatura foi controlada por termopares, onde os corpos de prova permaneceram a 950°C por 7 horas. Para melhor proteção contra oxidação os corpos de prova foram envolvidos em grafita.

6.6.3

Microscopia óptica

A caracterização microestrutural por esta técnica foi realizada em um microscópio óptico Neophot 30.

6.6.4

Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A obtenção de micrografias para a análise computacional de imagens da região deformada das buchas escoadas foi realizada no microscópio eletrônico de varredura Philips XL-30.

As micrografias obtidas neste microscópio foram transferidas para o programa de análise de imagens analySIS 2.1, desenvolvida pela firma Soft-Imaging Software GmbH, onde foi feito o estudo dos parâmetros geométricos das microestruturas das amostras analisadas. As principais características deste programa são descritas no anexo 12.8.

6.7

Medição de Microdureza Vickers HV 0,1

A medição de microdureza foi realizada em um microdurômetro Shimadzu HMV-2000, com carga de 100 g.

A distribuição dos pontos de medição de microdureza foi procedida de maneira a cobrir a área da seção transversal da bucha como um todo, para que o comportamento do perfil de microdureza pudesse ser avaliado de forma bidimensional na ZTA. Portanto, a ordenação dos pontos de medição consistiu de 6 faixas, que iniciavam próximo à borda da bucha e seguiam em direção ao material base. Estas faixas de medição foram então dispostas em alturas diferentes, como ilustrado na figura 39, separadas de 1 mm.

Na região superior da amostra, devido à maior disponibilidade de espaço, foi possível a distribuição de um número maior de pontos de medição em cada série. Já na região inferior da amostra o número de medições foi reduzido em função da espessura limitada da parede da bucha. Para cada série de medição foi definido um padrão de cor, em função da altura em relação à superfície superior da chapa. Este padrão de cores será seguido na apresentação dos diagramas de medição de microdureza.

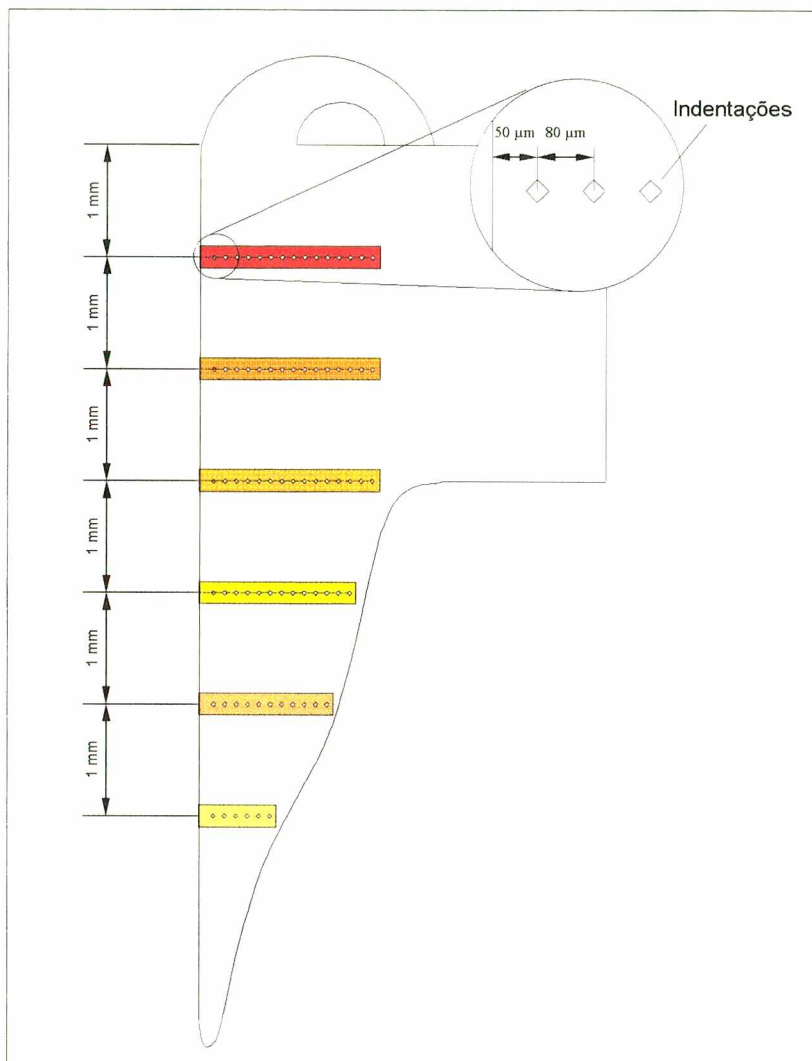


FIGURA 39 - Distribuição dos pontos de medição de microdureza Vickers HV 0,1.

6.8 Ensaio de Resistência à Tração

Os ensaios para determinação da carga de resistência máxima e da classe de resistência das amostras foram realizados em uma máquina de tração universal Zwick 1484, cujas características técnicas se encontram no anexo 12.11.

Os parafusos utilizados no tracionamento dos corpos de prova são da classe de resistência 12,9, segundo a norma DIN 912 [1].

Na tabela 5 estão listados os valores das cargas de teste para as classes de resistência de rosca métrica normal, segundo a norma DIN 267, parte 4 [22].

TABELA 5 – Cargas de teste para a rosca M8, segundo DIN 267/4 [22].

Classe de Res.	5	6	8	10	12
Carga [N]	18300	22000	29000	36500	43000

7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A apresentação dos resultados de trabalho é introduzida pelas variáveis de processo força de avanço, momento torçor e potência de acionamento mínima requerida para a conformação da bucha, que se referem às solicitações mecânicas atuantes na ferramenta e na máquina-ferramenta. A apresentação dos resultados foi dividida segundo os três grupos de amostras: com rotação e velocidade de avanço constantes, amostras com rotação constante e v_f variável e amostra com rotação e v_f variáveis. A seguir são apresentados os resultados de trabalho de conformação e temperatura, onde também foi seguido o mesmo padrão de apresentação dos resultados.

Na seção seguinte, com a apresentação dos resultados de geometria e qualidade das rebarbas e da intensidade de deformação, é feita uma introdução à análise microestrutural.

Posteriormente é desenvolvida a análise das transformações microestruturais propriamente dita, através de microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV) com análise gráfica computacional e da técnica do material recozido.

A apresentação dos resultados é concluída com a medição de microdureza e com os ensaios de resistência à tração.

7.1 Força de Avanço (Ff) e Momento Torçor (Mt)

7.1.1 Amostras com v_f constante

As figuras 40 e 41 mostram os resultados das amostras obtidas com v_f constante de 100 mm/min em processo, que apresentaram curvas de Ff e Mt típicas da cinemática do processo com v_f constante [3]. Nota-se também a influência das condições de entrada nos níveis máximos de força e momento. Na amostra 10300 ($n = 3000 \text{ min}^{-1}$) a $Ff_{\text{máx}}$ situou-se na faixa dos 3960 N, enquanto que na amostra 10600 ($n = 6000 \text{ min}^{-1}$) a $Ff_{\text{máx}}$ obtida foi da ordem de 3250 N. Na amostra 10300 o momento torçor atingiu o valor de 3,4 Nm, maior do que o da amostra 10600, que chegou apenas a 2,0 Nm.

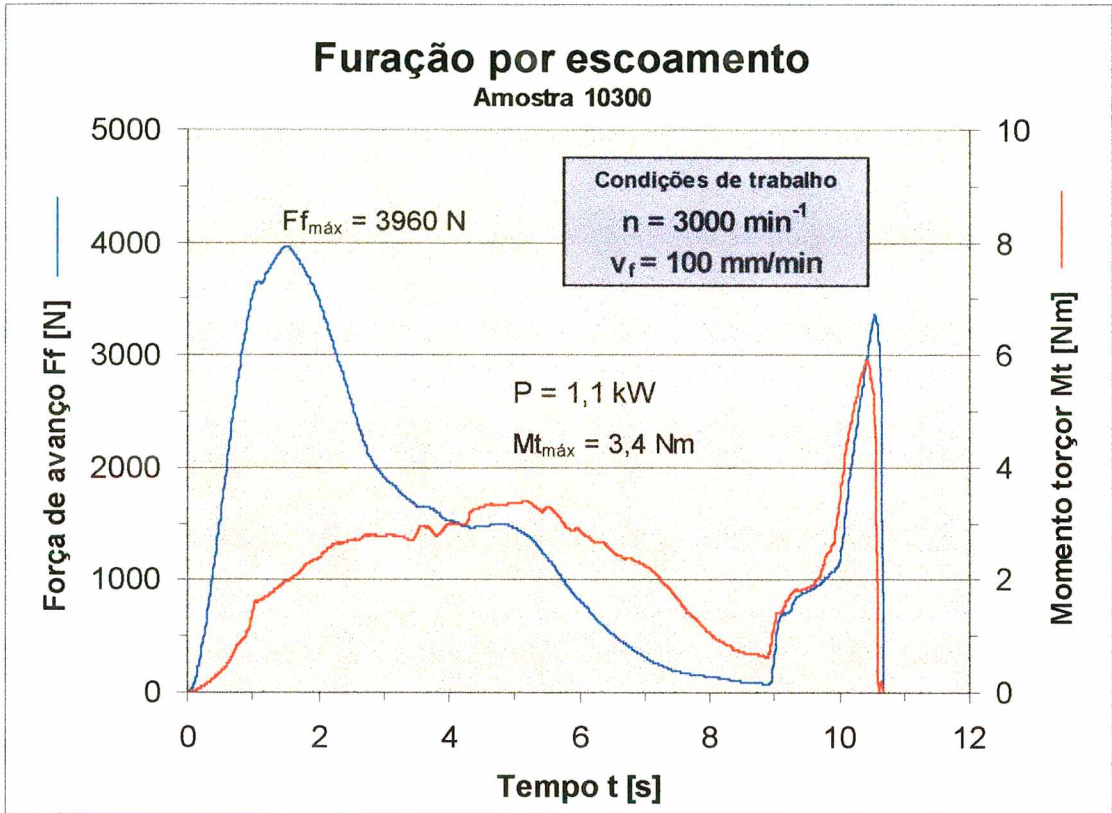


FIGURA 40 - Curvas de força de avanço e momento torçor da amostra 10300.

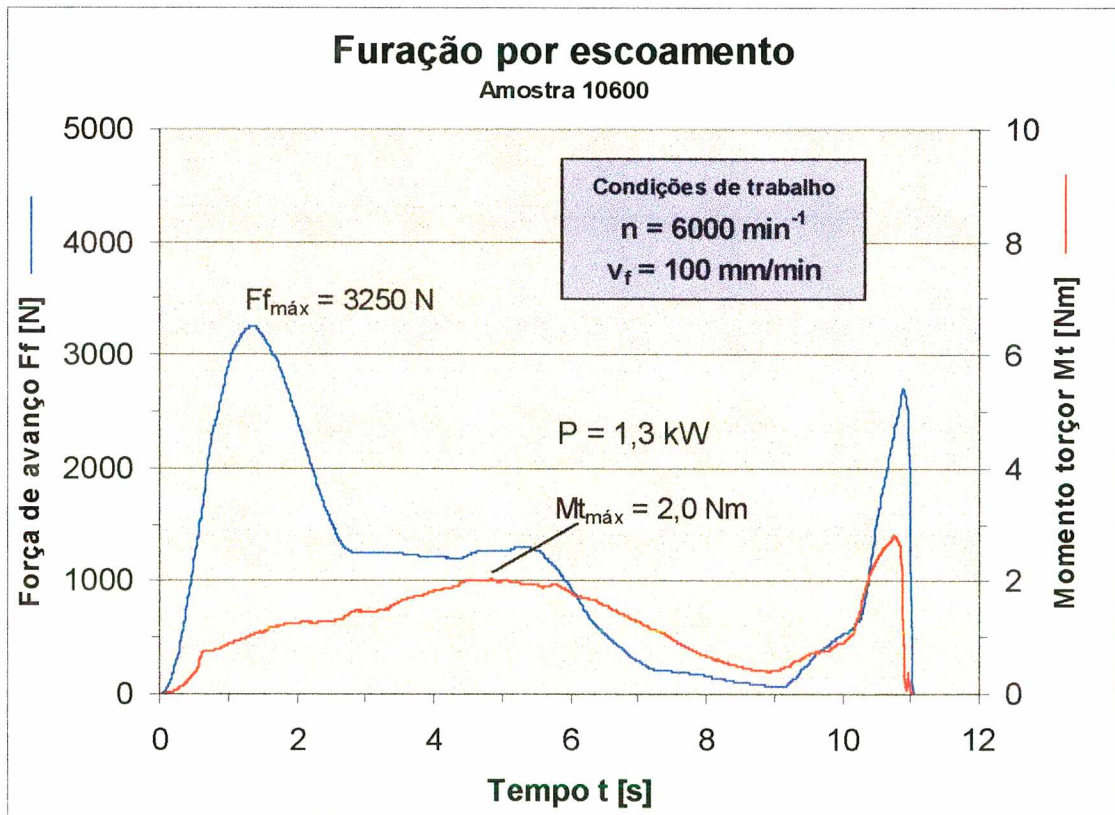


FIGURA 41 – Curvas de força de avanço e momento torçor da amostra 10600.

A potência mínima requerida para as amostras 10300 e 10600 foi de 1,1 kW e 1,3 kW respectivamente, embora a amostra 10300 apresentasse um valor de momento torçor máximo 66% maior que o da amostra 10600.

7.1.2

Amostras com v_f variável

Nas figuras 42 e 43 são apresentadas as curvas das amostras vf1 e vf2, para as quais foram utilizadas rotações constantes de 3000 e 6000 min^{-1} , respectivamente.

As curvas de força de avanço e momento torçor de ambas as amostras diferem basicamente na forma dos diagramas das amostras com v_f constante. Nas amostras vf1 e vf2 se destacam os picos $F_{f_{\text{máx}}}$ e $M_{t_{\text{máx}}}$ durante o período de aceleração da velocidade de avanço, notadamente mais elevados do que nas amostras 10300 e 10600.

Para a amostra vf1, com $n = 3000 \text{ min}^{-1}$, a $F_{f_{\text{máx}}}$ atingiu o valor de 4720 N, enquanto que na amostra vf2, com $n = 6000 \text{ min}^{-1}$, a mesma chegou apenas a 4400 N. O momento torçor máximo na amostra vf2, foi da ordem de 4,9 Nm, sensivelmente menor que o da amostra vf1, que chegou a 8,34 Nm.

Também nas amostras com v_f variável a potência mínima requerida foi maior para a amostra produzida com 6000 min^{-1} de rotação. Na amostra vf2 esta variável atingiu o valor de 3,1 kW, aproximadamente 18% a mais que na amostra vf1, onde a potência chegou a 2,6 kW.

Comparando-se as amostras produzidas com v_f variável com as amostras feitas com v_f constante, obtém-se para a $F_{f_{\text{máx}}}$ um aumento de 20% nas amostras com rotação de 3000 min^{-1} . Para as amostras com $n = 6000 \text{ min}^{-1}$ este aumento da $F_{f_{\text{máx}}}$ foi da ordem de 35%.

Para o $M_{t_{\text{máx}}}$ a diferença foi mais significativa entre as amostras analisadas. O aumento desta variável chegou a 140% nas amostras com $n = 6000 \text{ min}^{-1}$ e até a 145% com $n = 3000 \text{ min}^{-1}$.

A potência mínima requerida para a conformação da bucha, por depender diretamente do momento $M_{t_{\text{máx}}}$, teve aumento equivalente a esta variável nos dois primeiros grupos de amostras.

Um aspecto particular das curvas com v_f variável refere-se aos pontos de mudança da velocidade de avanço. Nestes pontos o aumento da força ou do momento é precedida por uma queda, decorrente da dinâmica do acionamento da máquina, que não permite uma aceleração instantânea.

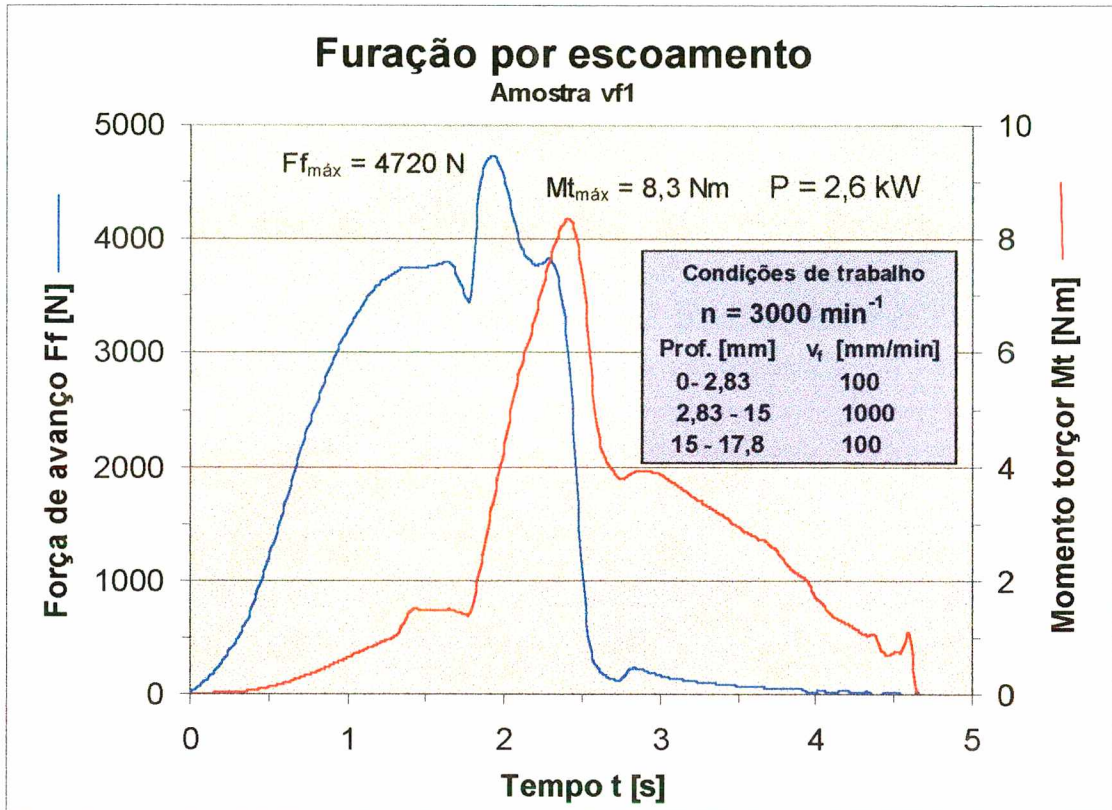


FIGURA 42 - Curvas de força de avanço e momento torçor da amostra vf1.

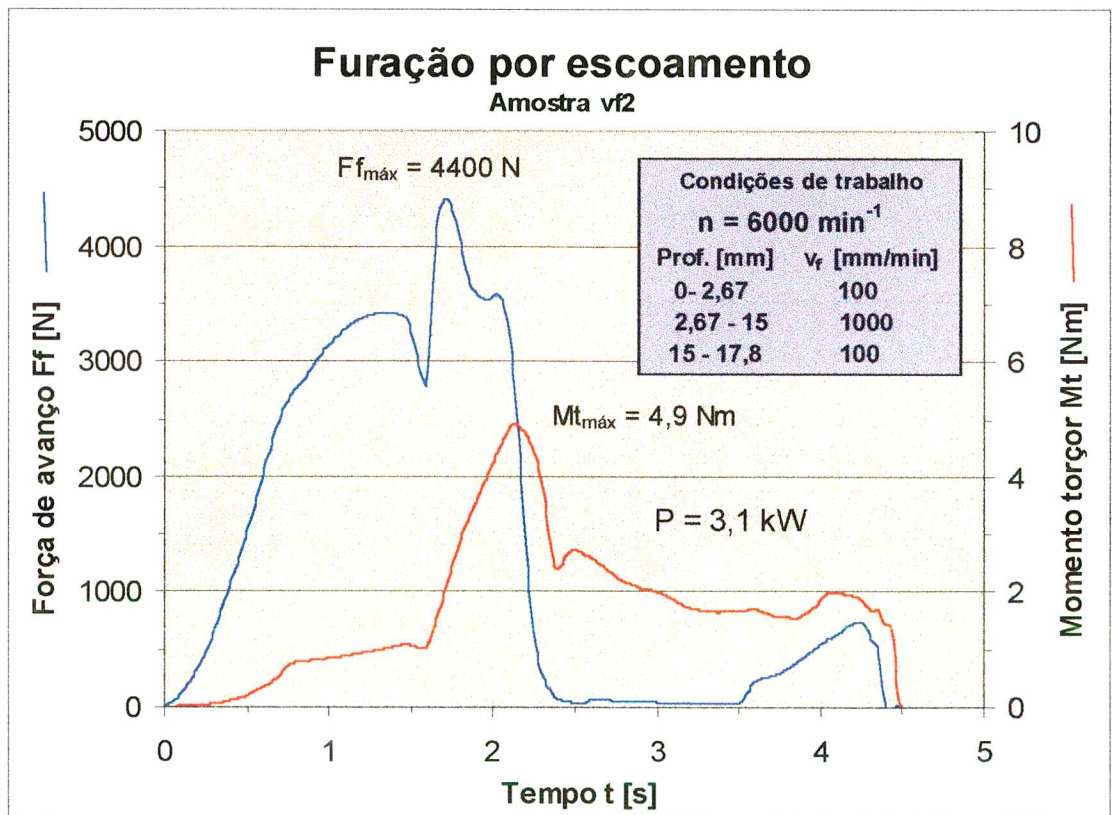


FIGURA 43 - Curvas de força de avanço e momento torçor da amostra vf2.

7.1.3

Amostra com rotação e v_f variáveis

Na figura 44 é apresentado o diagrama da amostra vf3, produzida com ambas as condições de trabalho variáveis em processo.

Nota-se neste diagrama a mudança característica da curva de força de avanço, em função tanto da diminuição da rotação como do aumento da velocidade de avanço em processo.

Nesta condição a $F_{f_{\max}}$ atingiu 4550 N, que é aproximadamente o valor médio entre as amostras vf1 e vf2. O $M_{t_{\max}}$ foi da ordem de 8,8 Nm, aproximadamente o mesmo da amostra vf1, com 3000 min^{-1} .

A potência mínima requerida também ficou no mesmo nível da amostra vf1, atingindo o valor 2,8 kW.

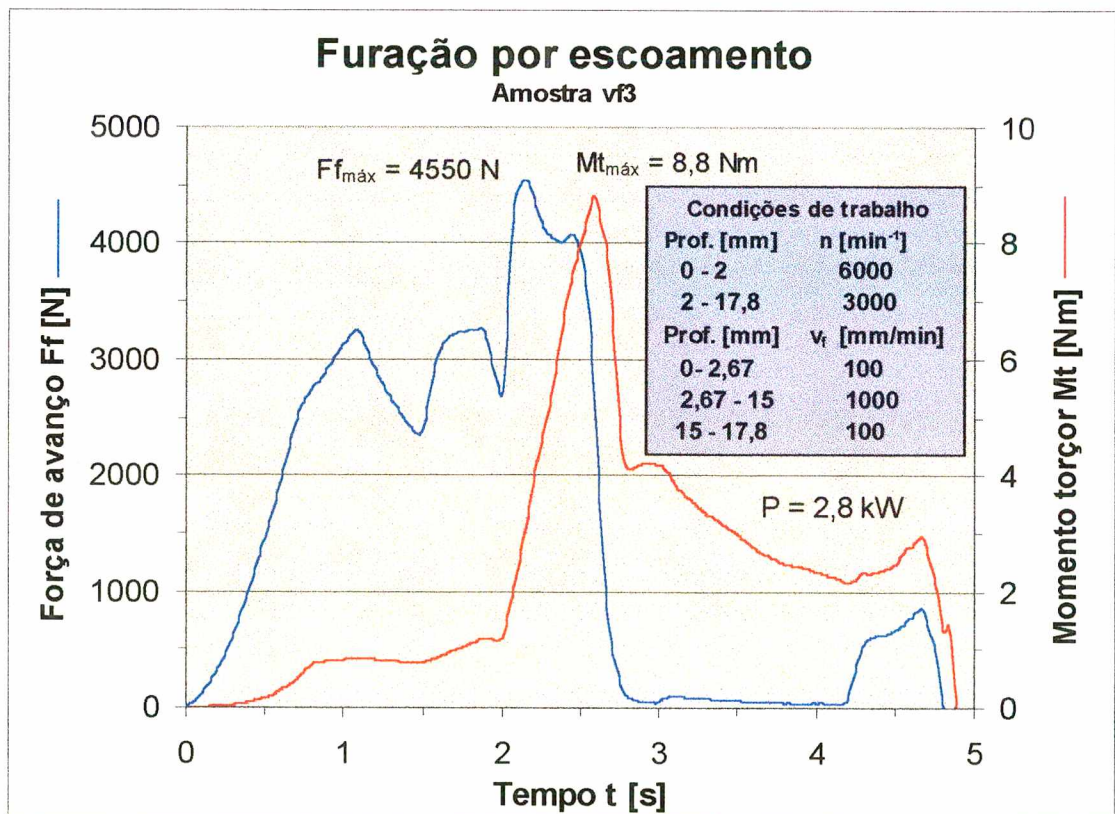


FIGURA 44 - Curvas de força de avanço e momento torçor da amostra vf3.

Nesta amostra também são visíveis, pela queda nos valores de F_f e M_t , os pontos de mudança de rotação e velocidade.

7.2 Trabalho de Conformação

Através da integração dos valores de força de avanço e momento torçor, em função do deslocamento e do ângulo de giro, respectivamente, foi calculada a quantidade de energia mecânica introduzida no processo através do trabalho de conformação. Na tabela 6 são apresentados os valores de trabalho de rotação W_R e trabalho de translação W_T para cada amostra.

TABELA 6 - Valores do trabalho de rotação e translação das amostras.

Amostra	Trabalho de Rotação W_R [J]	Trabalho de Translação W_T [J]	Trabalho total de conformação W_F [J]
10300	7620	30	7640
10600	8720	20	8740
vf1	3460	50	3510
vf2	4800	40	4850
vf3	3780	50	3830

Pela tabela verifica-se que nas buchas com v_f constante foi introduzida uma maior quantidade de energia, em comparação com as amostras com v_f variável. De todas as amostras a bucha produzida com rotação de 6000 min^{-1} foi a que atingiu o valor máximo, de 8740 J , aproximadamente o dobro da energia mecânica introduzida na fabricação das amostras com v_f variável.

Nas amostras com v_f variável observa-se também que maiores rotações levaram a maiores níveis de trabalho de conformação. Este fato pode ser observado nas amostras vf2 e vf3, nas quais a rotação de 6000 min^{-1} foi utilizada, foram atingidos valores de trabalho maiores do que na amostra vf1, produzida com $n = 3000 \text{ min}^{-1}$.

A pequena parcela do trabalho de translação é outro aspecto que pode ser observado, que é coerente com os ensaios de Kretschmer e Müller-Kraus [1,2].

7.3 Medição de Temperatura

A seguir são apresentadas as curvas de temperatura e gradiente de temperatura específico obtidos nos ensaios. O gradiente foi calculado a partir dos dados de temperatura entre dois pontos consecutivos.

Em cada condição de ensaio foram feitas três repetições, das quais foram calculados os valores de temperatura máxima média ($T_{Máx\ MED}$), gradiente de temperatura máximo médio ($\Delta T_{Máx\ MED}$) e taxa de resfriamento média ($\Delta T_{resf.\ MED}$), esta último obtida através da equação 14. Para os valores de $T_{Máx\ MED}$ e $\Delta T_{Máx\ MED}$ também foi calculado o desvio-padrão. Para o tratamento estatístico foram utilizadas as equações 16 e 17 do anexo 12.10.

$$\Delta T_{Resf.MED} = \frac{T_{MáxMED} - 400}{\Delta t} \quad (14)$$

7.3.1 Amostras com v_f constante

Nas figuras 45 e 46 são mostradas as curvas de temperatura para as amostras 10300 e 10600. Para estas condições de trabalho as temperaturas atingidas foram bastante superiores à temperatura $Ac1$ de um aço baixo carbono [30].

Na amostra 10300 a temperatura máxima média foi de 868 °C, enquanto que na amostra 10600 esta variável chegou a 888 °C, ligeiramente superior. Isto demonstra pouca influência da rotação nos valores máximos de temperatura destas amostras.

As velocidades de aquecimento do material nas amostras 10300 e 10600 foram equivalentes ($\Delta T_{Máx\ MED}$ de 257 °C/s e 280 °C/s, respectivamente). Na etapa de resfriamento a semelhança entre as duas amostras pode ser novamente observada. A amostra 10300 apresentou um $\Delta T_{resf.\ MED}$ de -95 °C/s, bastante próximo ao da amostra 10600, de -100 °C/s.

O valores de gradiente de temperatura deste primeiro grupo de amostras foram inferiores aos observados nos ensaios de Kals [21].

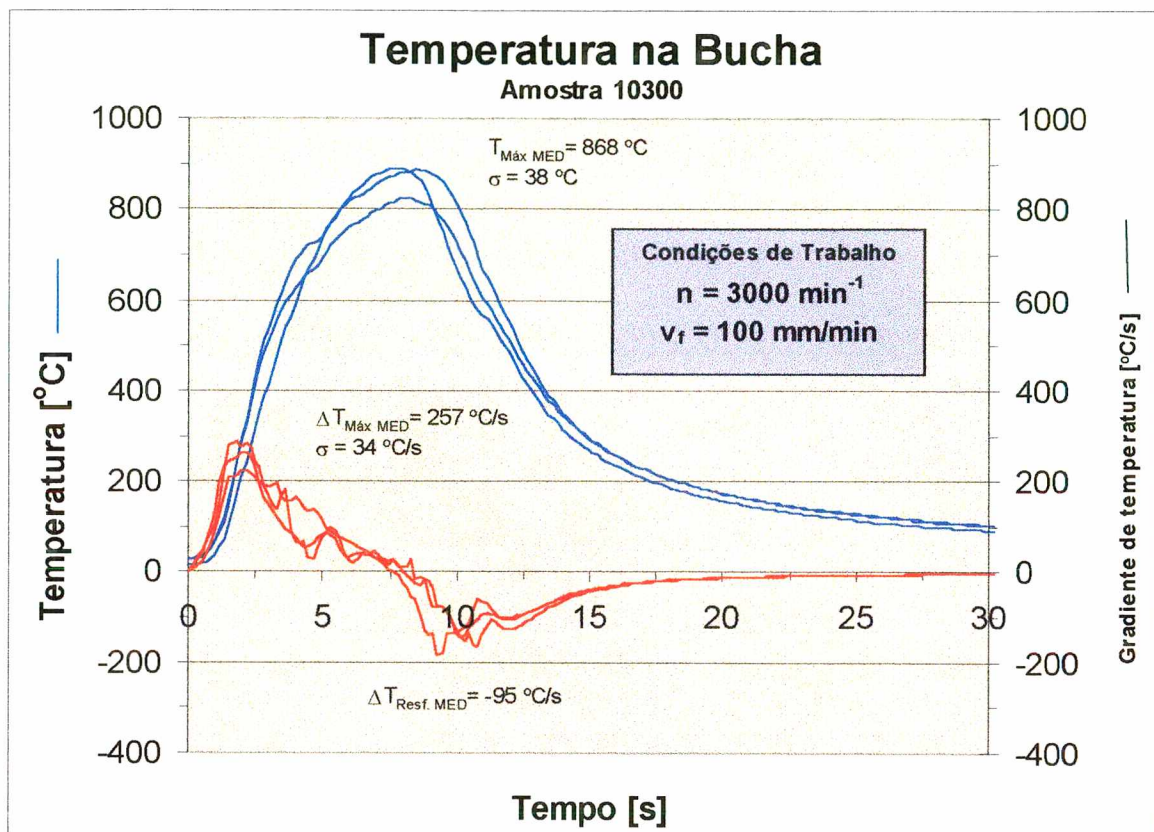


FIGURA 45 - Curva de temperatura e gradiente de temperatura para a amostra 10300.

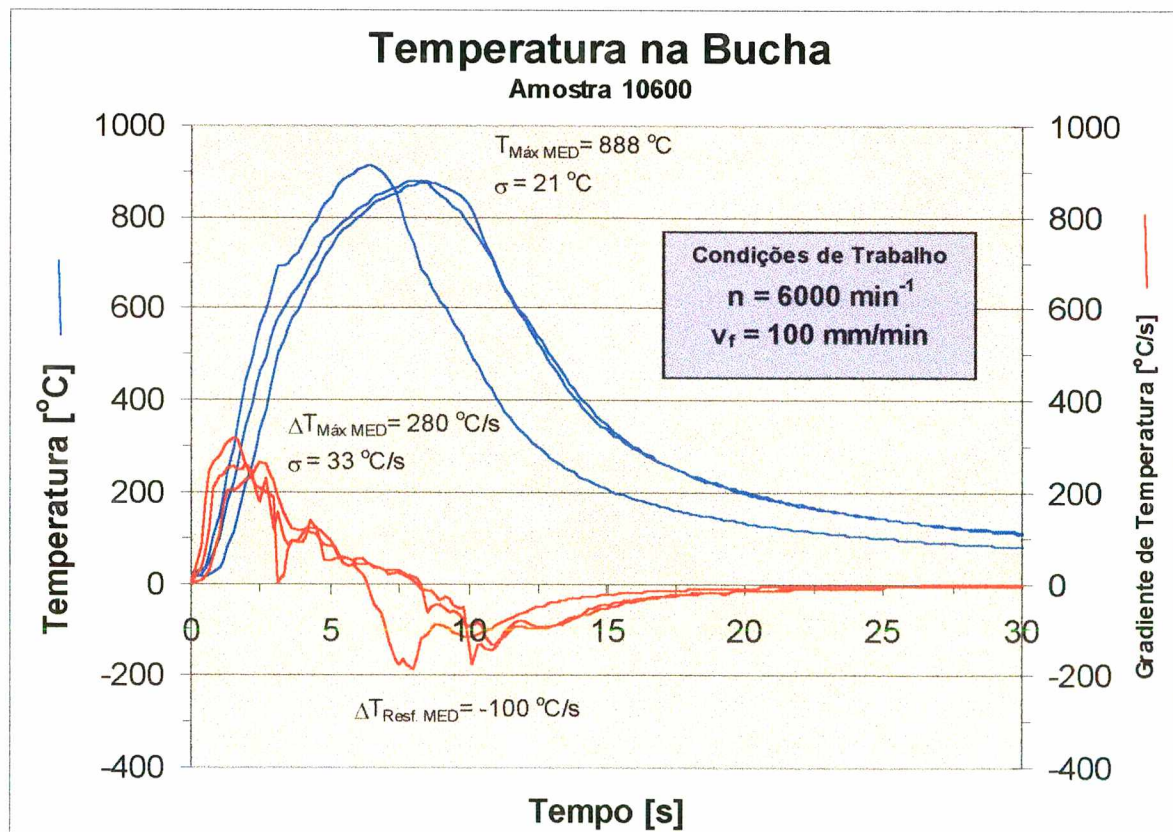


FIGURA 46 - Curva de temperatura e gradiente de temperatura para a amostra 10600.

O desvio-padrão para as curvas de temperatura foi percentualmente menor do que o obtido para as curvas de gradiente de temperatura, onde a repetibilidade foi menor. Nas curvas de gradiente de temperatura podem ser observadas pequenas oscilações, que na prática referem-se a pequenas e curtas variações de temperatura. Nas amostras 10300 e 10600 estas oscilações estão presentes tanto no aquecimento quanto no resfriamento.

Com taxas de transmissão de temperatura desta magnitude, os gradientes de resfriamento na furação por escoamento são equivalentes aos encontrados em processos de tratamento térmico [37], que em certos casos são da ordem de 100 °C/s.

7.3.2

Amostras com v_f variável

As figuras 47 e 48 mostram as curvas de temperatura para as amostras vf1 e vf2. Neste grupo de amostras pode-se perceber uma influência maior da rotação nos valores máximos de temperatura. Na amostra vf1 ($n = 3000 \text{ min}^{-1}$) verificou-se um valor de $T_{\text{Máx MED}}$ de 562 °C, enquanto que na amostra vf2 ($n = 6000 \text{ min}^{-1}$) a temperatura chegou a 726 °C.

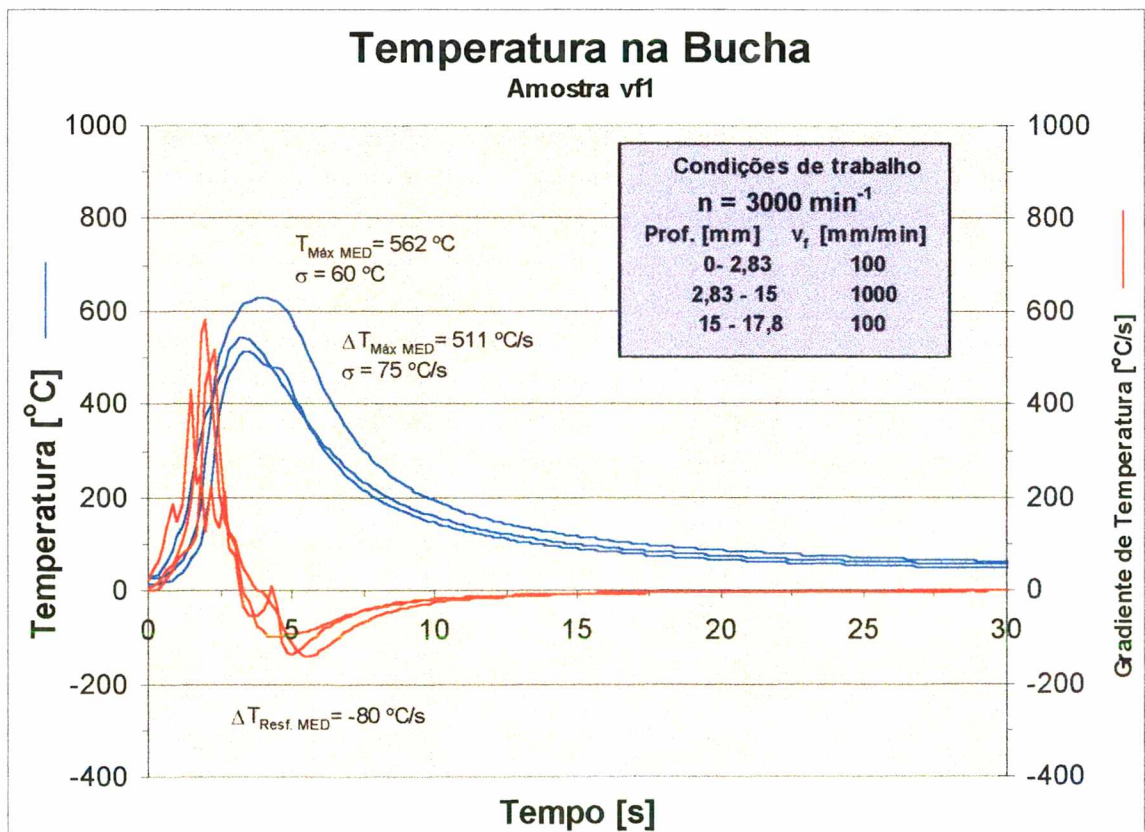


FIGURA 47 - Curva de temperatura e gradiente de temperatura para a amostra vf1.

Verifica-se também a influência do uso de velocidade de avanço variável em processo, que reduziu os valores máximos de temperatura atingidos durante o processo.

Esta influência da velocidade de avanço também refletiu-se fortemente na velocidade de aquecimento do material. Comparando as amostras com $n = 3000 \text{ min}^{-1}$, percebe-se que na amostra vf1 obteve-se um valor médio de 511 °C/s de velocidade de aquecimento, aproximadamente o dobro da amostra 10300.

Já nas amostras com $n = 6000 \text{ min}^{-1}$ a influência da velocidade variável foi ainda mais significativa. A amostra vf2 chegou a um gradiente de aquecimento médio de 919 °C/s , aproximadamente três vezes maior que o da amostra 10600.

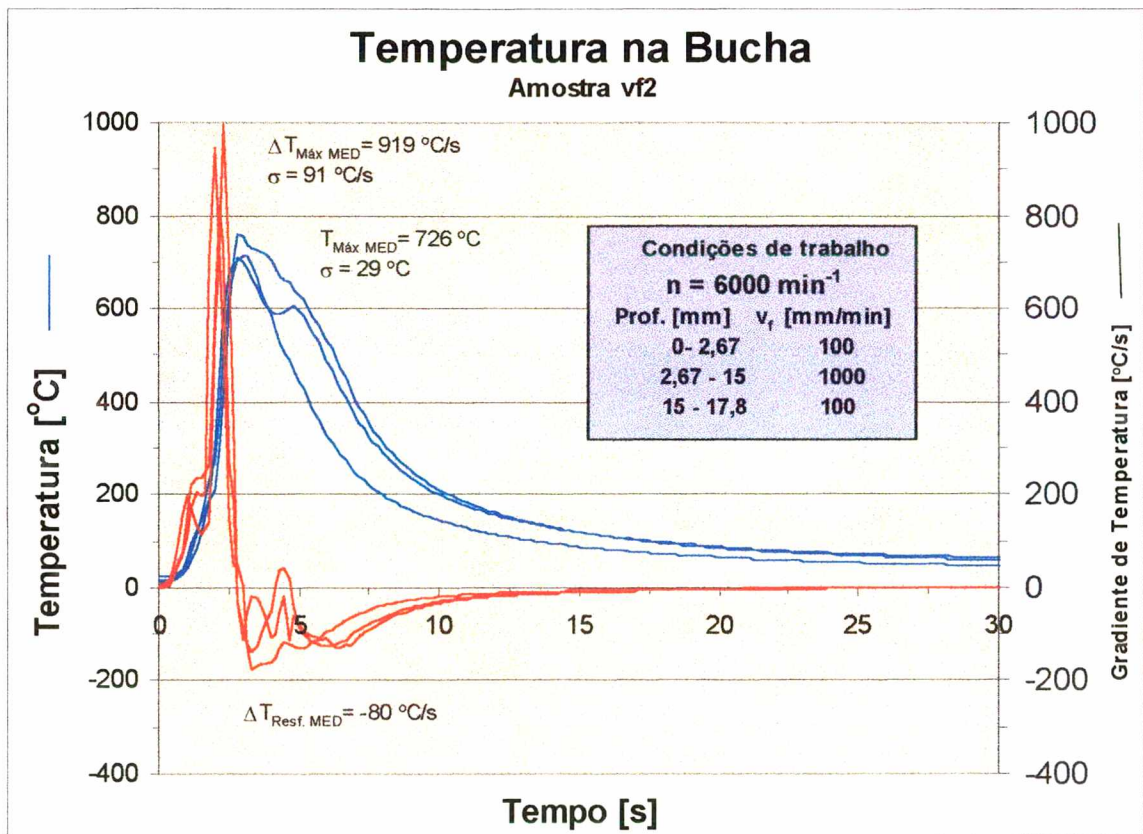


FIGURA 48 - Curva de temperatura e gradiente de temperatura para a amostra vf2.

Os valores de taxa de resfriamento médio das amostras vf1 e vf2, da ordem de -80 °C/s , foram ligeiramente menores que os obtidos para as amostras do primeiro grupo.

A repetibilidade das curvas de temperatura do segundo grupo de amostras também foi equivalente ao primeiro grupo. A amostra vf1, entretanto, apresentou uma dispersão de resultados maior, com o desvio-padrão da ordem de 60 °C para a $T_{\text{Máx MED}}$.

Por outro lado, nas curvas de gradiente de aquecimento das amostras vf1 e vf2 a dispersão dos resultados foi maior, em comparação com as amostras 10300 e 10600.

7.3.3

Amostra com rotação e v_f variáveis

A figura 49 mostra a curva de temperatura para a amostra vf3. Com os valores de $T_{Máx\ MED} = 515\text{ °C}$ e de $\Delta T_{Máx\ MED} = 446\text{ °C/s}$, esta amostra apresentou na etapa de aquecimento um comportamento semelhante ao observado para a amostra vf1.

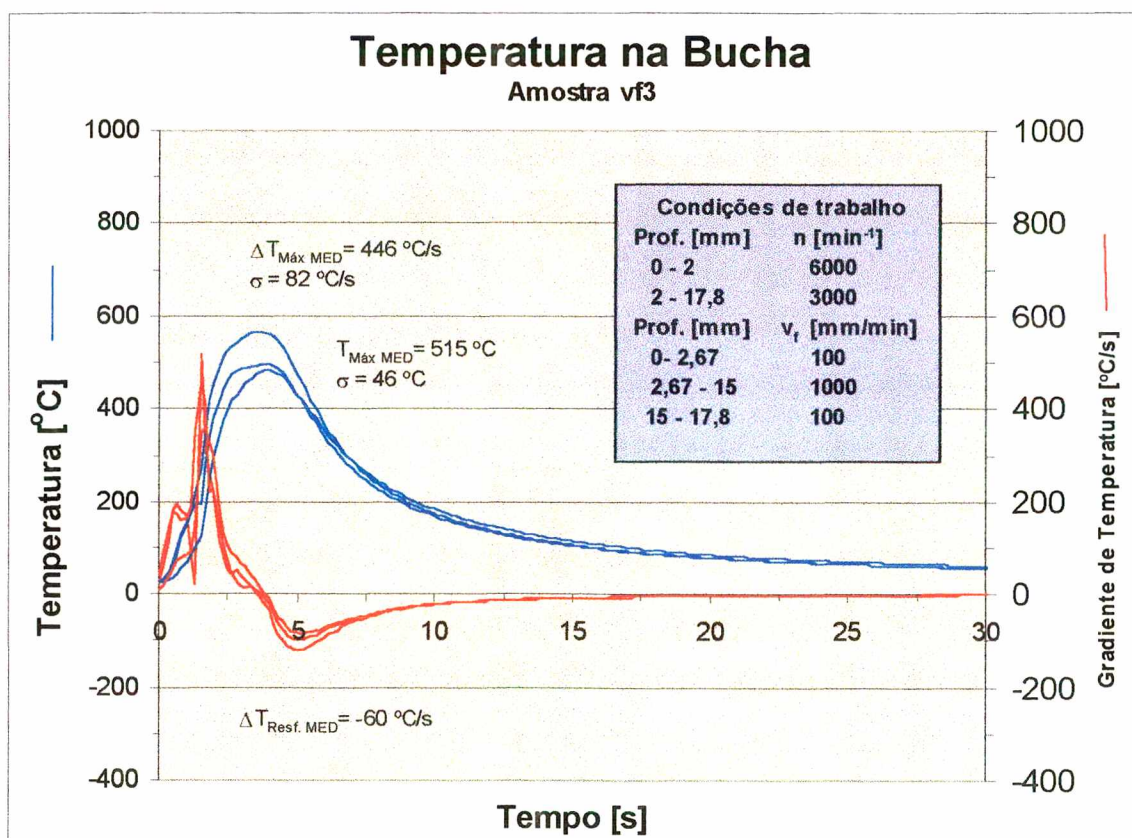


FIGURA 49 - Curva de temperatura e gradiente de temperatura para a amostra vf3.

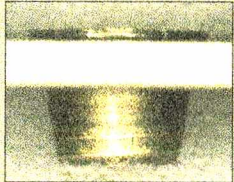
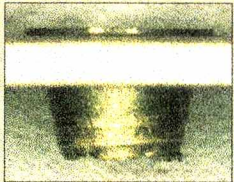
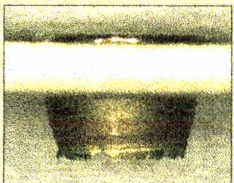
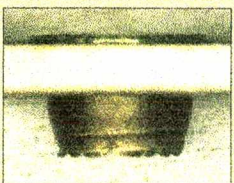
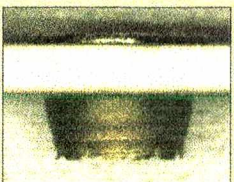
Já na fase de resfriamento foi verificada uma velocidade menor de resfriamento, com $\Delta T_{Resf.\ MED}$ da ordem de -60 °C/s .

A dispersão dos resultados manteve-se nos patamares observados para as amostras vf1 e vf2. Como característica comum das amostras com velocidade de avanço variável em processo, a repetibilidade nos valores de gradiente de aquecimento foi menor, comparado com as amostras 10300 e 10600.

7.4 Geometria e Qualidade da Bucha Escorada

Na tabela 7 são apresentados os resultados da espessura de parede e_p e do comprimento da bucha ℓ , juntamente com a porcentagem de ruptura da rebarba δ , que determina a qualidade da rebarba, segundo a figura 21, da página 29.

TABELA 7 – Dimensões e qualidade das buchas escoradas.

Amostra	e_p [mm]	ℓ [mm]	Qualidade da Rebarba	
10300	1,13	7,76		$\delta = 4\%$ Grupo I
10600	1,27	8,47		$\delta = 5\%$ Grupo I
vf1	1,31	7,21		$\delta = 7\%$ Grupo I
vf2	1,16	7,42		$\delta = 5\%$ Grupo I
vf3	1,29	7,26		$\delta = 4\%$ Grupo I

Analisando os valores das amostras com v_f constante observa-se que o incremento de rotação aumentou o comprimento da bucha, já que o comprimento ℓ da amostra 10600 ($n = 6000 \text{ min}^{-1}$) foi maior que o da amostra 10300 ($n = 3000 \text{ min}^{-1}$).

Todas as buchas com v_f variável apresentaram comprimento menor que o das amostras com v_f constante. Já na espessura de parede e_p o comportamento é diferenciado. As amostras vf1 e vf3 apresentaram praticamente a mesma espessura, maior do que a apresentada pelas amostras 10300 e 10600. Na amostra vf2, entretanto, obteve-se um valor próximo ao das amostras com v_f constante. Dentre todas as amostras, na bucha vf1 obteve-se o menor comprimento e a maior espessura.

A qualidade da rebarba de todas as amostras foram da classe I, com porcentagem de ruptura δ abaixo de 10%. Este fato indica que para as condições ensaiadas praticamente não houve influência dos parâmetros de entrada na qualidade da rebarba.

As fotografias das amostras mostram que as buchas produzidas com velocidade de avanço variável são em geral mais curtas, com paredes mais espessas.

7.5

Tempo de Processo e Intensidade de Deformação

Na tabela 8 são apresentados os valores de tempo principal para cada amostra analisada, onde pode-se observar a redução no tempo principal de processo proporcionado pela aceleração da velocidade de avanço.

Comparando-se as amostras com v_f variável com as amostras 10300 e 10600, obtém-se uma diminuição de aproximadamente 50% no tempo de processo.

TABELA 8 - Valores de tempo principal de processo.

Amostra	Tempo principal [s]
10300	10,5
10600	10,5
vf1	4,6
vf2	4,2
vf3	4,6

A intensidade de deformação sofrida pelas amostras durante a execução do processo pode ser estimada através da equação 13, página 41. Nesta equação observa-se que a taxa de deformação, e portanto a intensidade de deformação, é inversamente proporcional ao tempo.

Como as amostras com v_f variável foram as que apresentaram os tempos de processo mais curtos, estas foram conformadas com uma maior velocidade de deformação, estando sujeitas, portanto, a uma maior taxa de deformação, quando comparadas às amostras 10300 e 10600.

7.6 Análise Microestrutural

7.6.1 Microscopia óptica

Amostras com v_f constante

As figuras 50 e 51 mostram as micrografias obtidas por microscopia óptica das amostras das condições de ensaio 10300 e 10600. Para referenciar as posições das micrografias na bucha foi utilizado um código de cores. Esta padronização foi seguida para todas as amostras.

A micrografia B da amostra 10300 ($n = 3000 \text{ min}^{-1}$) mostra o estado do material base, com uma microestrutura ferrítico-perlítica recristalizada, de textura típica de um material laminado a quente [37]. A primeira micrografia da região deformada (ampliação A) mostra um região de refino de grão na borda interna da bucha. Nesta posição o alcance da zona termomecanicamente afetada pode ser estimado em $250 \mu\text{m}$, a partir da borda.

A micrografia C ilustra uma microestrutura mais heterogênea. Nota-se a presença simultânea de refino de grão, próximo à superfície, e de grãos ferríticos aciculares, mais à direita. Na micrografia D, a presença de grãos aciculares é mais intensa. A ampliação (E) mostra a região mais deformada da bucha. Nesta ampliação observa-se uma estrutura acicular e a presença de grãos de ferrita equiaxiais.

Analisando a seguir a micrografia B da amostra 10600 ($n = 6000 \text{ min}^{-1}$) pode-se observar a condição do material base, que se encontra num estado semelhante ao da amostra 10300. Na região mais próxima à borda interna da bucha, ilustrada pela micrografia A, se encontra uma microestrutura semelhante à condição do material base. Observa-se, entretanto, como na amostra 10300, uma pequena faixa onde houve refino de grão. O alcance da ZTA nesta região é menor que o da amostra 10300, atingindo no máximo $150 \mu\text{m}$.

As micrografias da região mais inferior da bucha C, D, e E ilustram microestruturas com grande concentração de estrutura acicular.

Em comparação à amostra 10300, a região E da amostra 10600 apresenta uma microestrutura mais afetada termomecanicamente. Nesta micrografia se destaca a inexistência de grãos equiaxiais, indicando transformação de fases em temperaturas relativamente baixas.

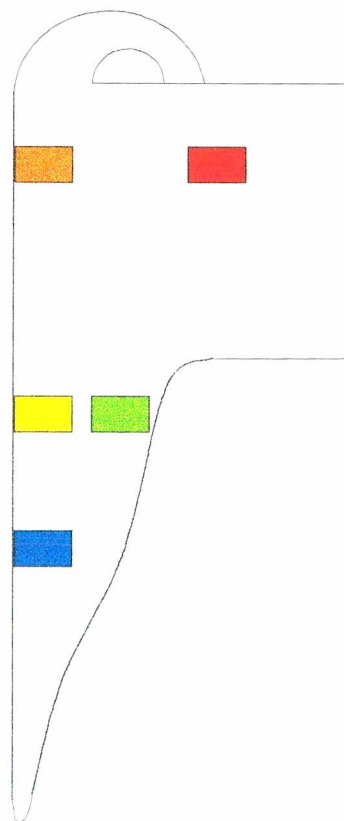
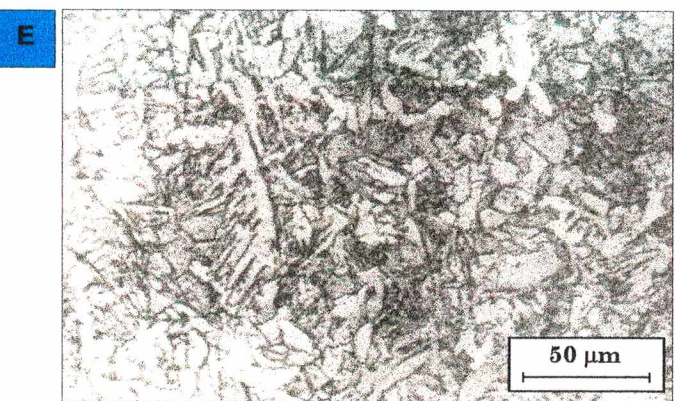
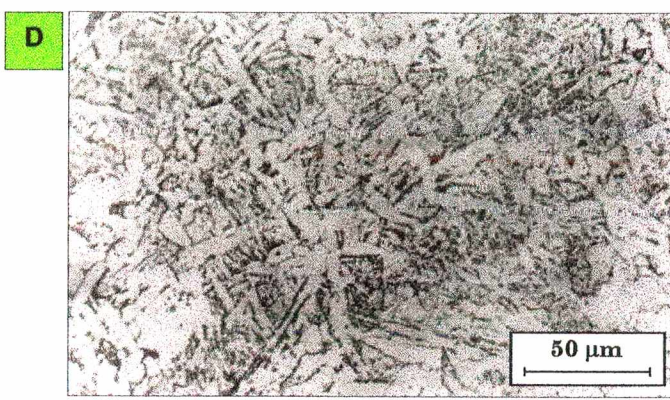
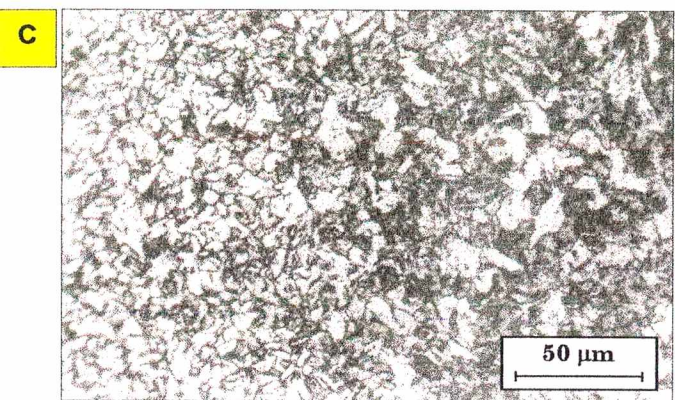
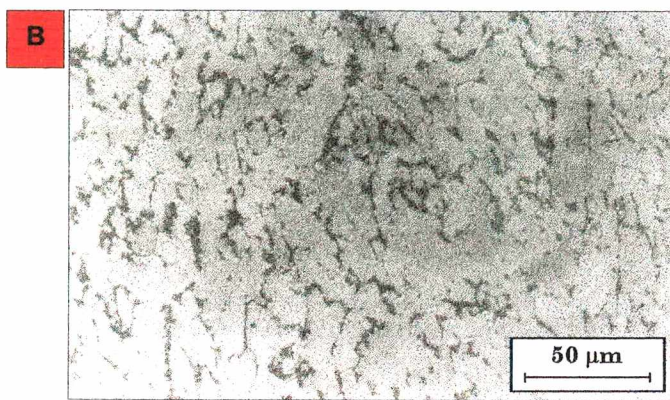
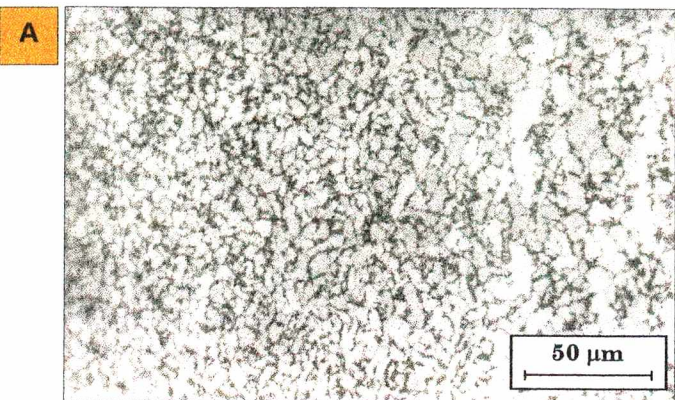


FIGURA 50 - Micrografias da amostra 10300.

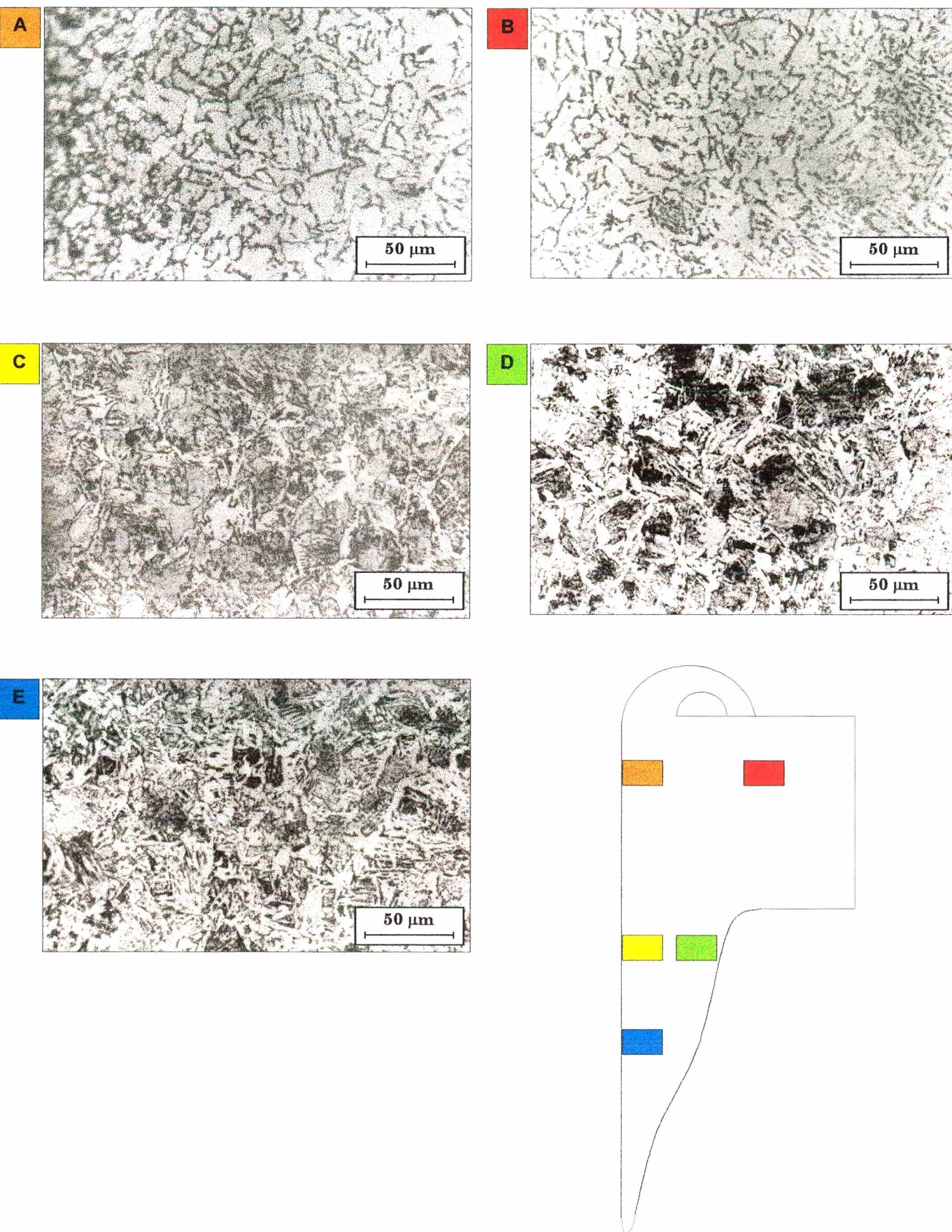


FIGURA 51 - Micrografias da amostra 10600.

Amostras com v_f variável

As micrografias das amostras obtidas com as condições vf1 e vf2, produzidas com rotação constante e v_f variável, são apresentadas nas figuras 52 e 53.

De forma semelhante às amostras 10300 e 10600, a região B (material base) das amostras vf1 e vf2 também apresenta uma textura típica de material ferrítico-perlítico laminado a quente, demonstrando que a matéria-prima dos ensaios é homogênea.

Comparando a ilustração A com a B da amostra vf1 ($n = 3000 \text{ min}^{-1}$), observa-se a ocorrência de intenso refino de grão no material da região deformada, na altura da chapa, cuja zona de abrangência supera a faixa de $250 \mu\text{m}$.

O refino de grão e a ocorrência de recristalização se destacam nas micrografias C, D e E desta amostra. Nota-se, entretanto, que o refino de grão na amostra vf1 ocorreu de forma heterogênea, como pode ser visto pela variação no tamanho de grão da região superior para a parte inferior da amostra, e também da borda do furo em direção à superfície externa da parede da bucha.

De forma semelhante à amostra vf1, ocorreu na região A da amostra vf2 ($n = 6000 \text{ min}^{-1}$) um intenso refino de grão, cuja abrangência também ultrapassou a faixa dos $250 \mu\text{m}$.

Na região deformada houve intensa recristalização, como pode ser observado nas ampliações C, D e E, onde a presença de grãos equiaxiais é dominante. Nesta região o refino de grão foi menos significativo que o encontrado na amostra vf1, embora tenha ocorrido de forma mais homogênea, sem gradiente. Em ambas as amostras não foram encontrados sinais de grãos aciculares.

Amostra com rotação e v_f variáveis

Na figura 54 é ilustrada a micrografia da amostra vf3, produzida com rotação e velocidade de avanço variáveis. As ampliações A e B apresentaram uma microestrutura bastante semelhante às observadas nas amostras anteriores.

Do mesmo modo que as amostras anteriores, na região A também ocorreu intenso refino de grão, cuja abrangência chegou próximo a $200 \mu\text{m}$, menor do que a ZTA das amostras vf1 e vf2. A ocorrência de recristalização e do gradiente de refino de grão também marcam a região mais deformada da amostra, ilustrada nas micrografias C, D e E.

A exceção nesta amostra foi a região D, que mostrou uma microestrutura grosseira, semelhante à do material base.

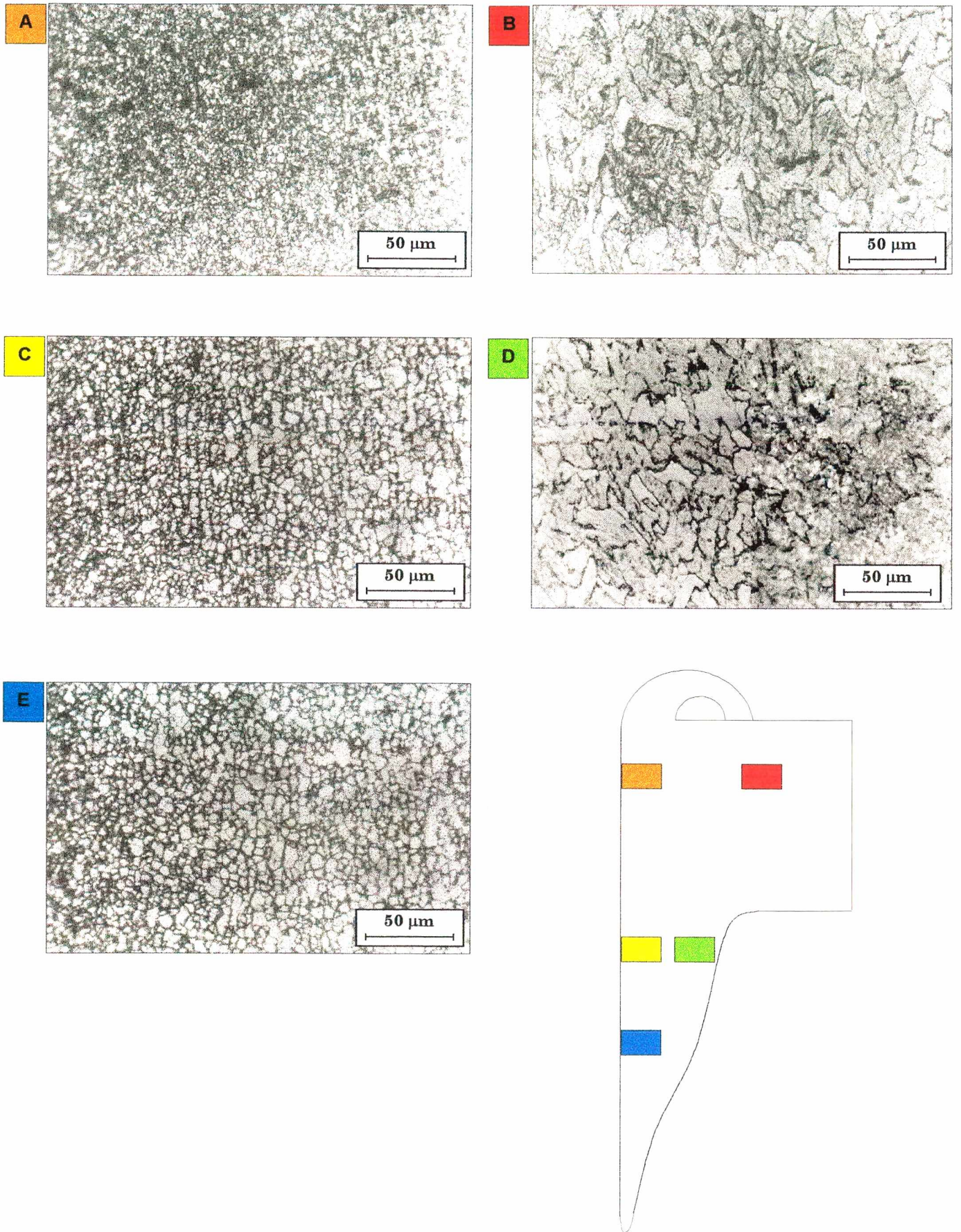


FIGURA 52 – Micrografias da amostra vf1.

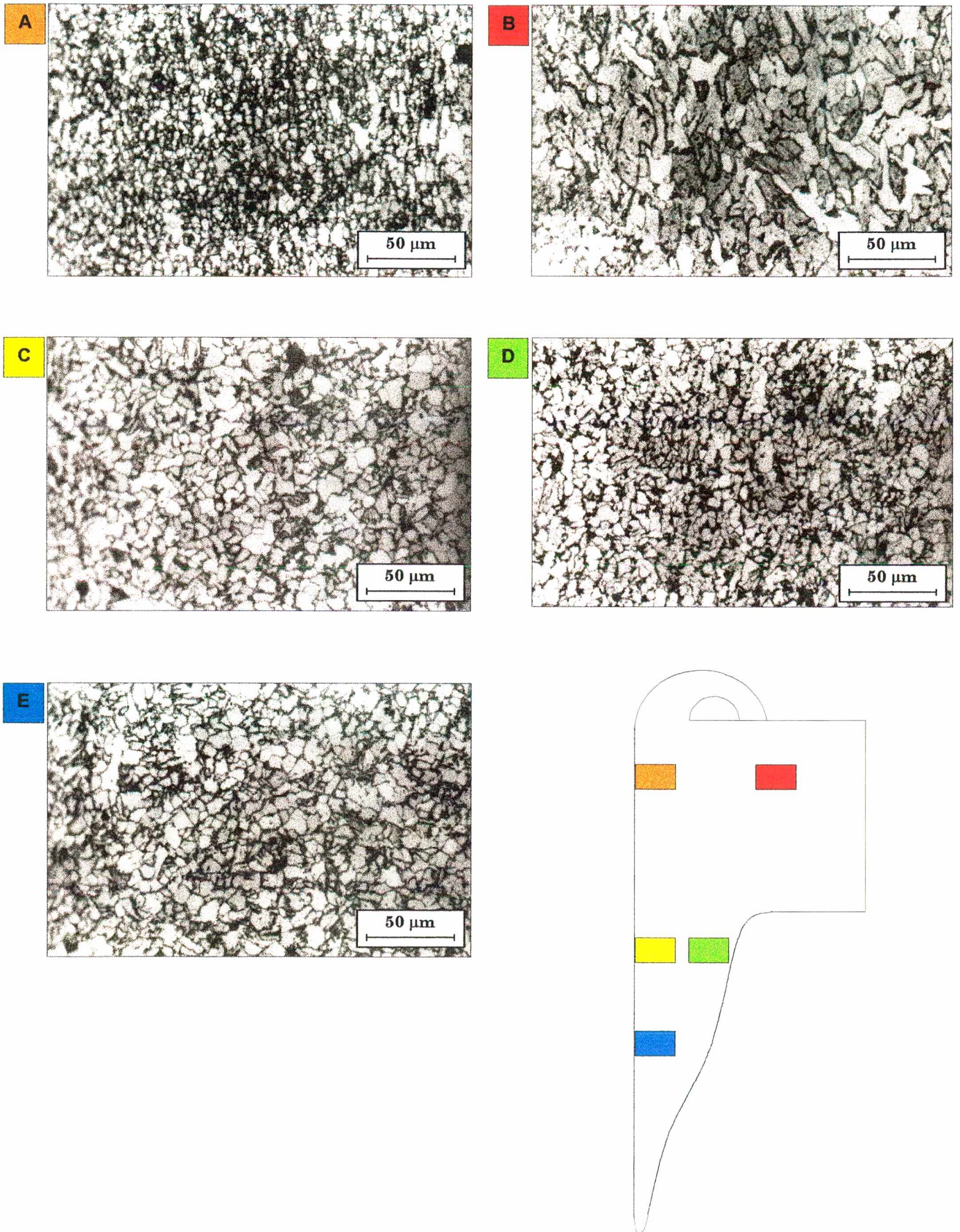


FIGURA 53 – Micrografias da amostra vf2.

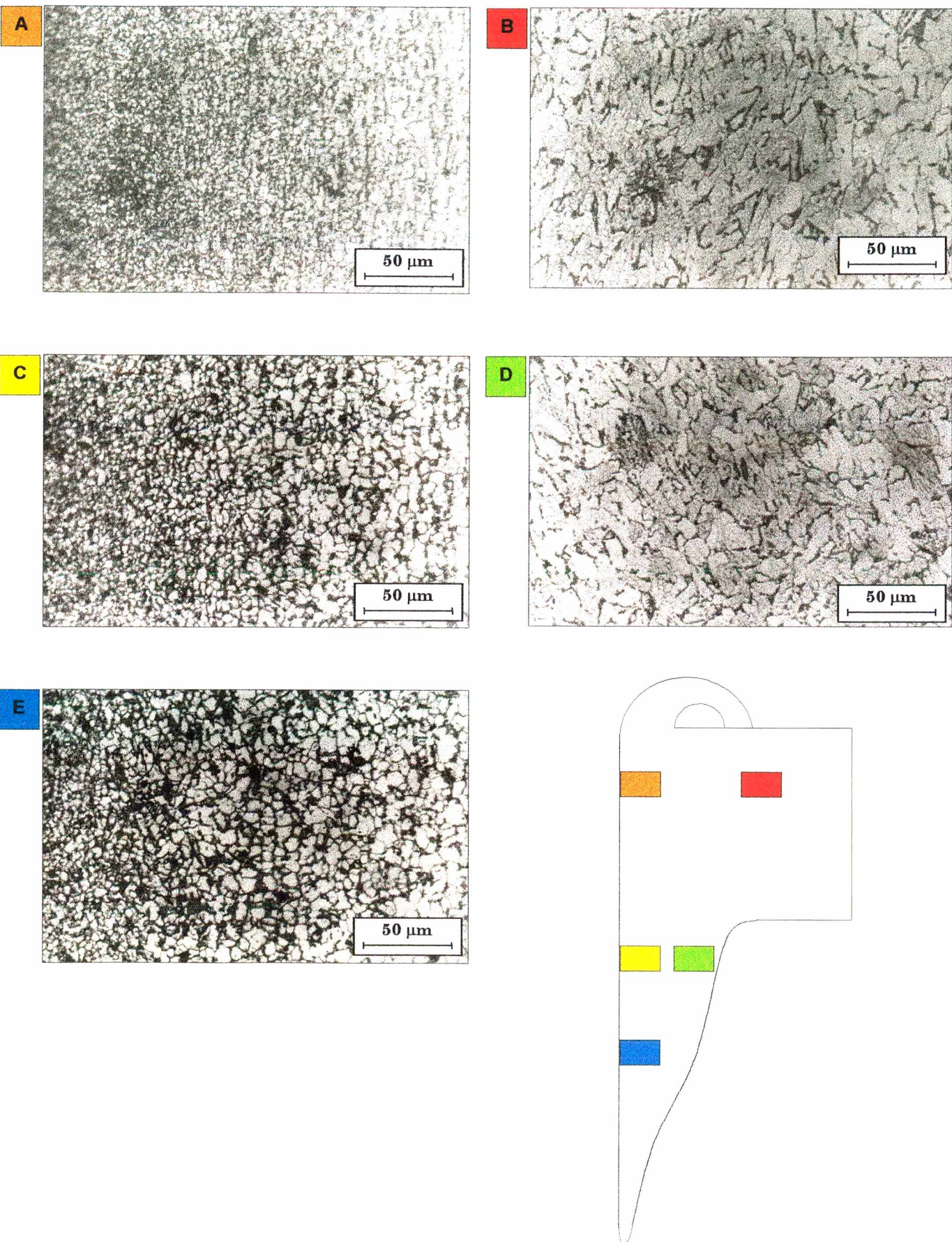


FIGURA 54 - Micrografias da amostra vf3.

7.6.2

Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para cada amostra foram realizadas duas micrografias através do microscópio eletrônico de varredura, uma da região E, da região deformada inferior da bucha e outra da região B, do material base.

Para cada micrografia foi desenvolvida a análise das variáveis fator de forma s , diâmetro médio d e área a dos grãos da microestrutura, através de gráficos de distribuição acumulativa e de classificação por códigos de cores.

A primeira análise foi feita do material base (região B) da amostra vf3, ilustrada na figura 55, tomada aqui como caracterização padrão para o material base. Na figura 56 são apresentados os gráficos das grandezas geométricas para esta micrografia.

Como característica principal do material laminado a quente se destaca a microestrutura completamente recristalizada. Analisando o gráfico do fator de forma, verifica-se que esta microestrutura apresenta uma distribuição na faixa de 0,6-0,7. Pode-se observar também nesta curva que a maior parcela dos grãos possuem fator de forma $> 0,6$, isto é, há uma predominância de grãos equiaxiais no estado original do material SAE 1012.

Para o diâmetro médio e a área dos grãos foram obtidas as distribuições para o material base em torno de valores da ordem de $15 \mu\text{m}$ e $100 \mu\text{m}^2$, respectivamente, típicos de uma microestrutura relativamente grosseira.

Amostras com v_f constante

Na figura 57 é apresentada a micrografia da região deformada da amostra 10300. Logo abaixo, na figura 58, são plotados os gráficos do fator de forma, do diâmetro médio e da área dos grãos.

Pela distribuição do fator de forma nota-se que uma parte da microestrutura sofreu recristalização, a julgar pelo presença de grãos com fator de forma entre 0,8-0,9. Por outro lado, a presença de um número maior de grãos com fator de forma entre 0,5 e 0,6 denota a presença de grãos alongados e de geometria complexa, típicos de uma estrutura acicular.

O refino de grão na região deformada pode ser observado pela distribuição do diâmetro médio dos grãos, que passaram de $15 \mu\text{m}$ no material base para a faixa de $6 \mu\text{m}$ nesta micrografia. Este refino de grão também pode ser observado tanto na redução de área dos grãos, que passaram de $100 \mu\text{m}^2$ no material base para $28 \mu\text{m}^2$, como verificado nas figuras de distribuição por código de cores.

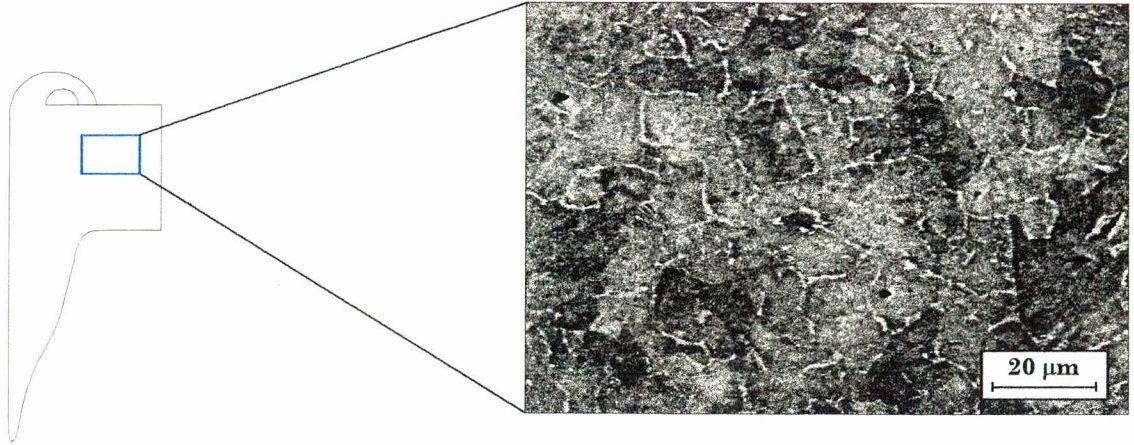


FIGURA 55 - Micrografia (MEV) do material base da amostra vf3.

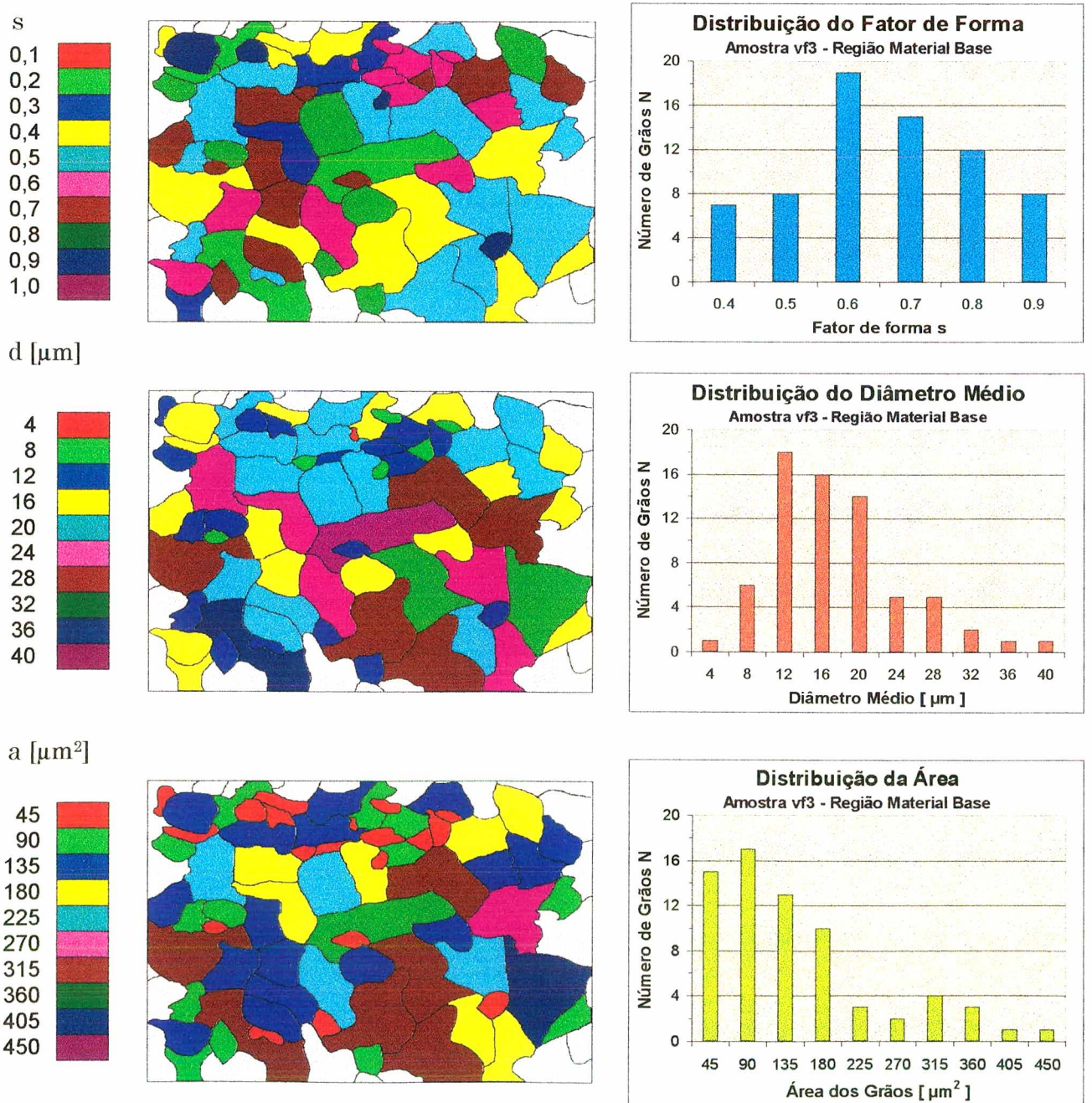


FIGURA 56 - Classificação e distribuição das variáveis s, d e a do material base.

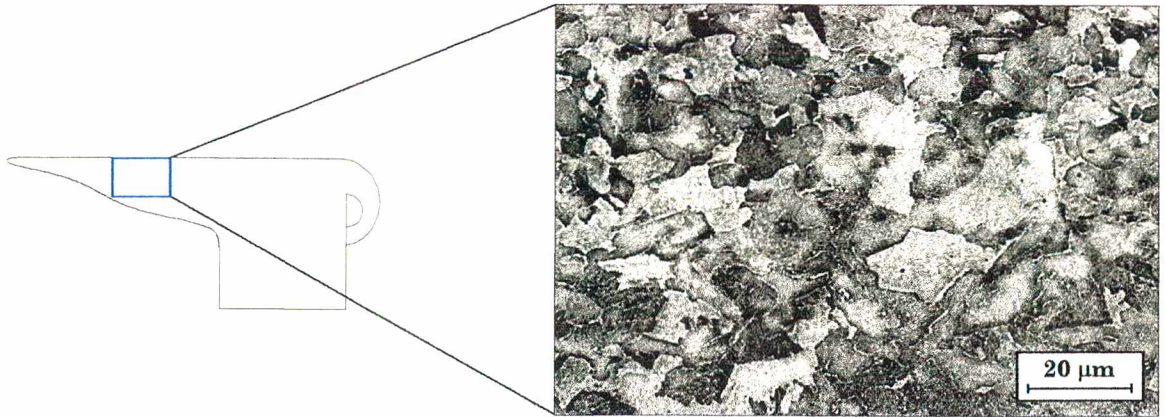


FIGURA 57 – Micrografia (MEV) da região deformada da amostra 10300.

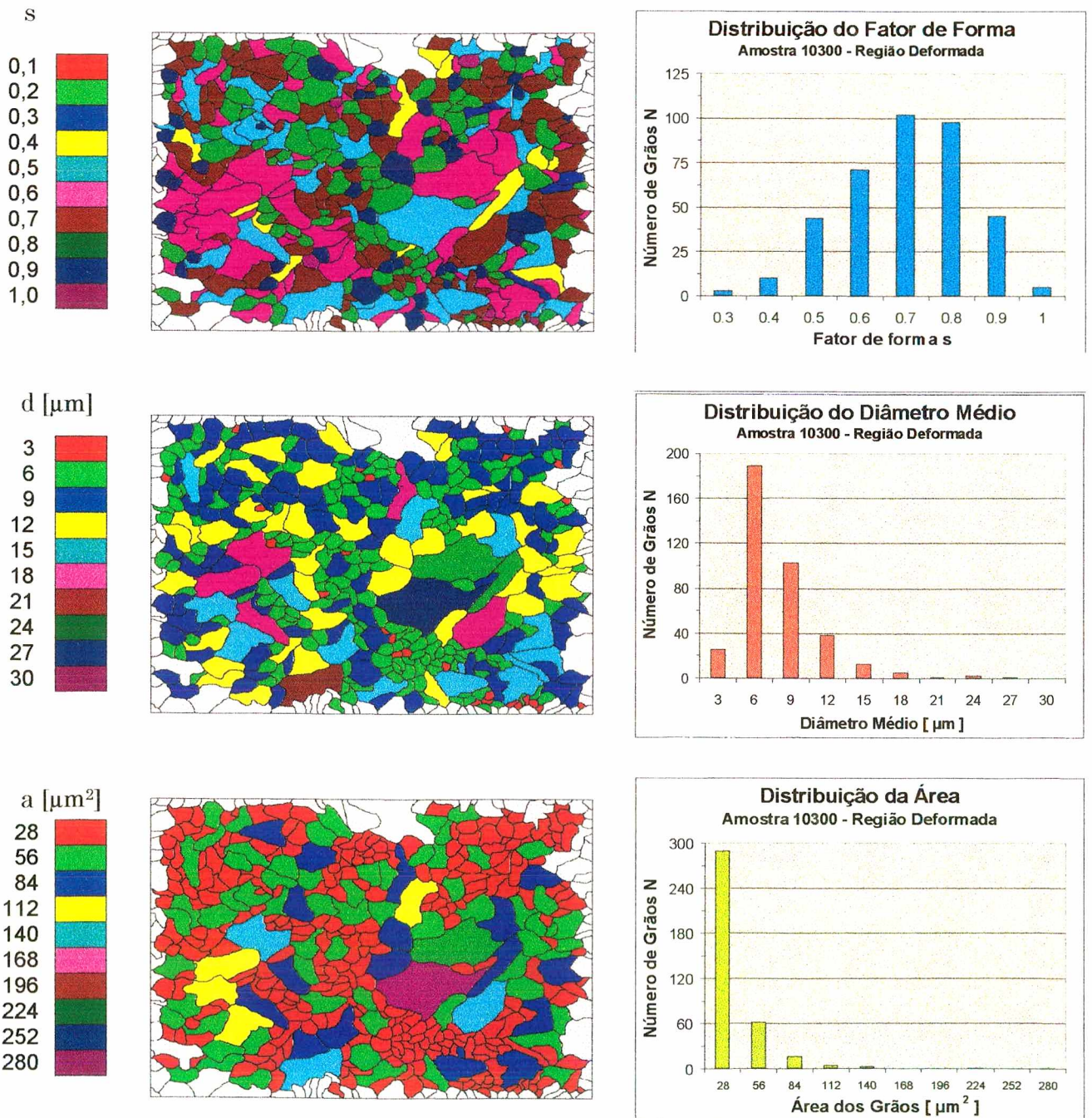


FIGURA 58 - Classificação e distribuição das variáveis s, d e a da amostra 10300.

A micrografia e os gráficos das grandezas geométricas da microestrutura da região deformada da amostra 10600 são apresentados nas figuras 59 e 60.

Verifica-se que a distribuição do fator de forma concentrou-se em valores menores, entre 0,4 e 0,5, devido à grande concentração de grãos aciculares, que são formas geométricas estreitas e alongadas. Grãos aciculares podem ser vistos tanto na micrografia como nas ilustrações de classificação por código de cores.

Analisando a seguir a distribuição do diâmetro médio, percebe-se que houve uma diminuição no tamanho de grão, mas de baixa intensidade. Assim como no material base, a distribuição do diâmetro médio situou-se em torno de 12-20 μm . Esta pequena redução no tamanho de grão também foi refletida na distribuição da área dos grãos, que se deslocou levemente da faixa de 45-135 μm^2 para 30-70 μm^2 .

Uma característica importante que pode ser observada nesta micrografia é a heterogeneidade da microestrutura, representada pela larga faixa de distribuição das três grandezas geométricas analisadas. No gráfico do fator de forma, por exemplo, pode ser observado um número significativo de grãos com $s \approx 0,8$, denotando a presença de grãos equiaxiais, sugerindo que parte da microestrutura sofreu recristalização.

Amostras com v_f variável

Na figura 61 é apresentada a micrografia da amostra vf1. Logo abaixo também são listados os gráficos de distribuição das grandezas geométricas, na figura 62.

Ao contrário das amostras 10300 e 10600, a recristalização é predominante nesta amostra. A distribuição do fator de forma se assemelha bastante a uma distribuição normal, com valor médio em torno de 0,8. Grãos com este fator de forma são equiaxiais, cuja formato se aproxima ao de um hexágono.

Esta grande concentração de grãos equiaxiais pode ser observada na classificação por cores do fator de forma, onde grãos de cor mais escura (marrom, azul-escuro, roxo) são maioria.

O intenso refino de grão é outra característica marcante desta amostra. Da faixa de 12-16 μm de diâmetro médio no material base, os grãos passaram a 3 μm , como pode ser observado no diagrama correspondente, cuja distribuição também se assemelha a uma distribuição normal. O fenômeno de diminuição do tamanho de grão também reflete-se na distribuição da área dos grãos, que passaram da faixa de 45-135 μm^2 no material base para em torno de 4,5 a 9 μm^2 na região deformada. Na distribuição por código de cores, grãos de cor vermelha e verde, da faixa de 4,5 a 9 μm^2 , são predominantes.

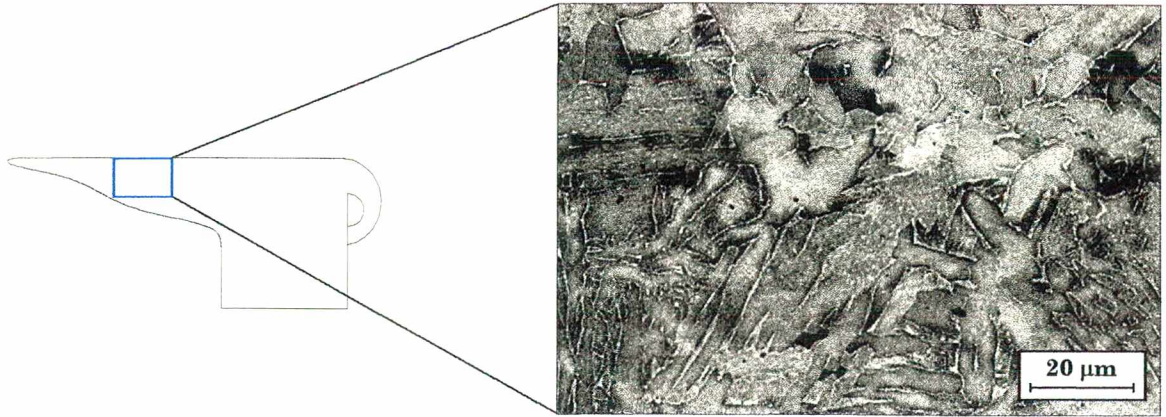


FIGURA 59 – Micrografia (MEV) da região deformada da amostra 10600.

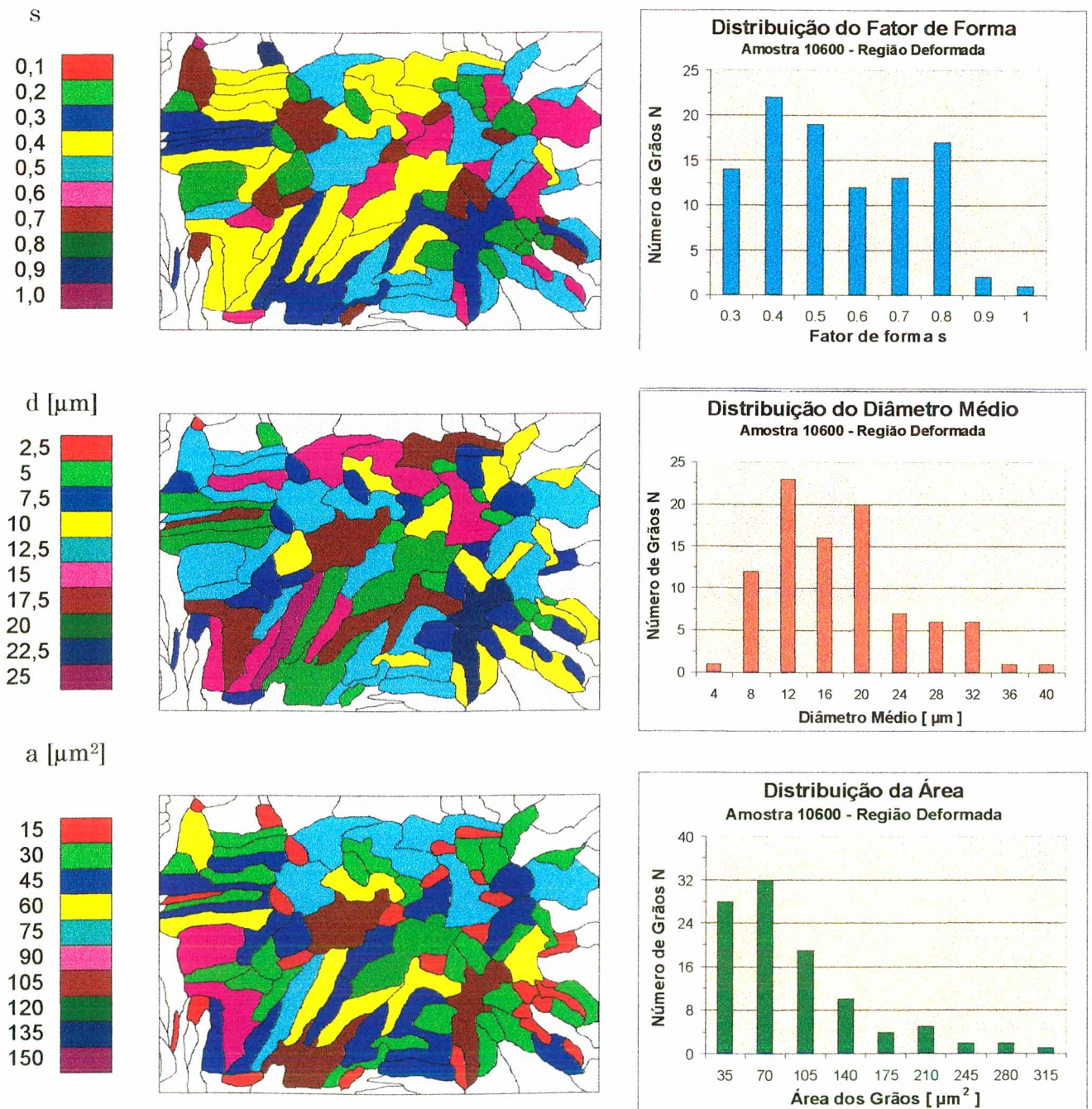


FIGURA 60 - Classificação e distribuição das variáveis s, d e a da amostra 10600.

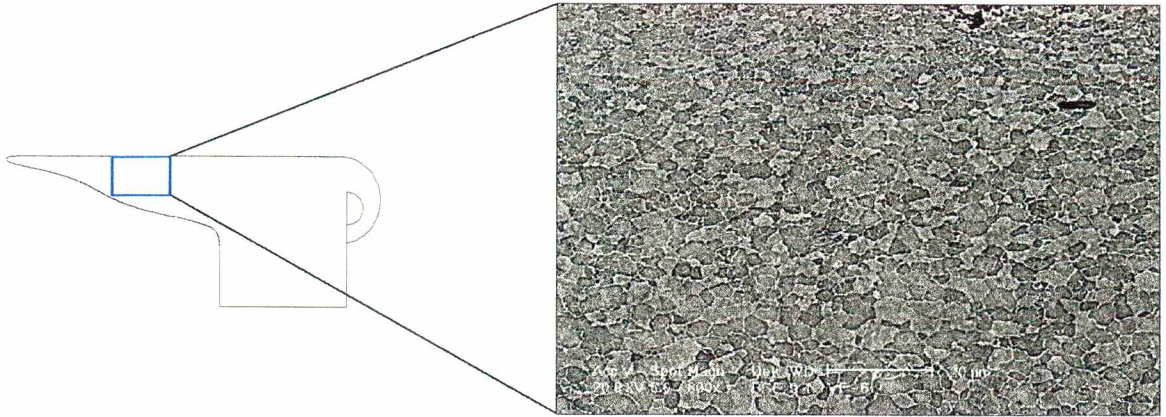


FIGURA 61 – Micrografia (MEV) da região deformada da amostra vf1.

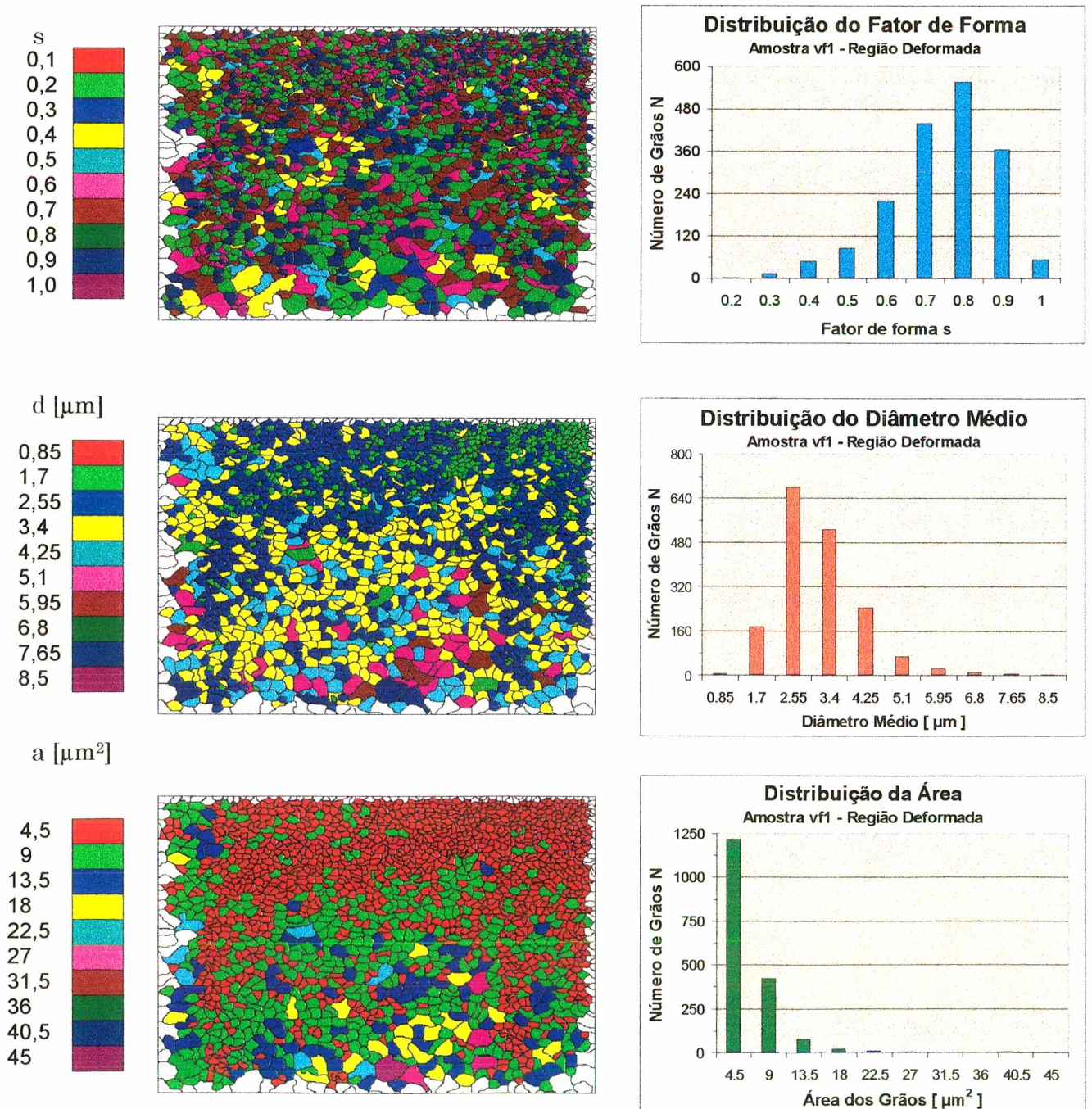


FIGURA 62 - Classificação e distribuição das variáveis s, d e a da amostra vf1.

Nas figuras 63 e 64 é mostrada a análise da região deformada da amostra vf2 por microscopia eletrônica de varredura.

Do mesmo modo que na amostra vf1, a intensa recristalização é característica marcante nesta micrografia. Este fato é comprovado numericamente pela distribuição do fator de forma em torno de 0,7-0,9, uma faixa mais larga que a amostra vf1, mais ainda de forma predominante dentro da faixa de valores de grãos com formato equiaxial. Deve-se observar também uma presença significativa de grãos de geometria mais complexa, com $s \approx 0,2-0,5$, sugerindo a presença de estrutura acicular.

A forte redução no tamanho de grão também caracteriza a região deformada desta amostra. De valores de diâmetro em torno de 12-16 μm no material base, a distribuição de tamanho de grão concentrou-se em torno de 6 μm na parte inferior da bucha.

A transformação de uma microestrutura grosseira do material base, para outra mais refinada na região deformada, também pode ser comprovada pela drástica redução na área dos grãos. No material base obteve-se a distribuição da área dos grãos em torno da faixa de 45-135 μm^2 , enquanto que na região E a distribuição concentrou-se em torno de 15 μm^2 , consideravelmente menor. Este fato também pode ser evidenciado pela grande presença de grãos de cor vermelha e verde na classificação por código de cores da áreas dos grãos.

Amostra com rotação e v_f variáveis

Nas figuras 65 e 66 são apresentadas as micrografias da região deformada da amostra vf3 e seus respectivos diagramas de distribuição das grandezas geométrica fator de forma s , diâmetro médio d e área dos grãos a .

Esta amostra apresentou um comportamento bastante semelhante ao da amostra vf1. Mais uma vez o fenômeno da recristalização pode ser observado claramente na distribuição do fator de forma, que se concentrou na faixa de grãos com $s \approx 0,7-0,9$. A pequena presença de grãos com baixo fator de forma nesta amostra sugere a quase inexistência de estrutura acicular na região deformada.

O refino de grão na região deformada foi praticamente da mesma intensidade que o verificado para a amostra vf1, a julgar pela distribuição de diâmetro médio dos grãos, que também se concentrou na faixa de 2,7-4,5 μm .

A forte presença de grãos de cor vermelha e verde na classificação por cores da área dos grãos também confirma a significativa diminuição do tamanho de grão na região deformada desta amostra.

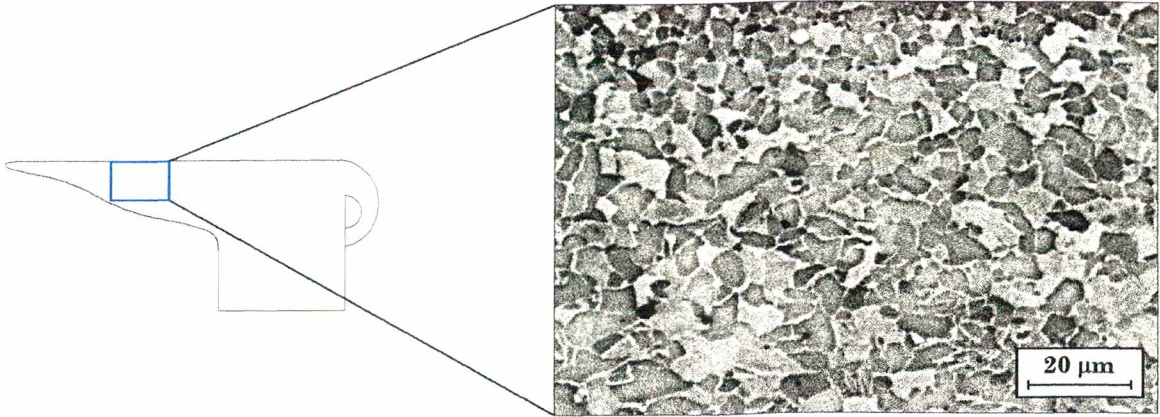


FIGURA 63 – Micrografia (MEV) da região deformada da amostra vf2.

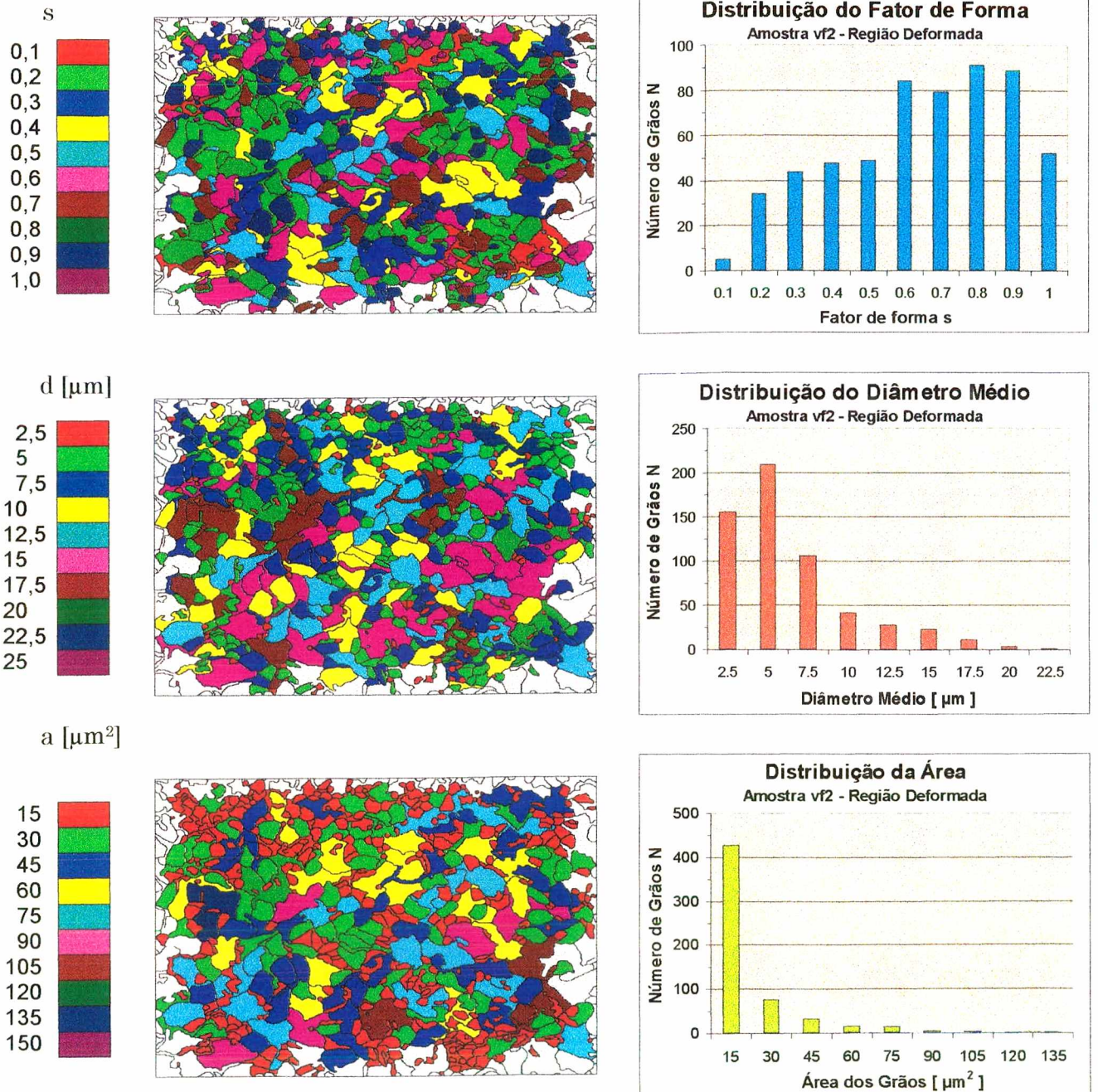


FIGURA 64 – Classificação e distribuição das variáveis s, d e a da amostra vf2.

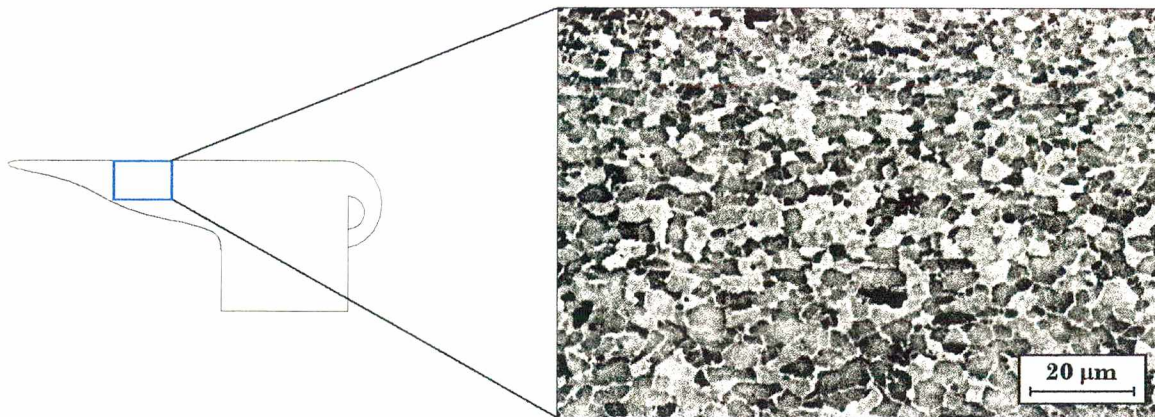


FIGURA 65 – Micrografia (MEV) da região deformada da amostra vf3.

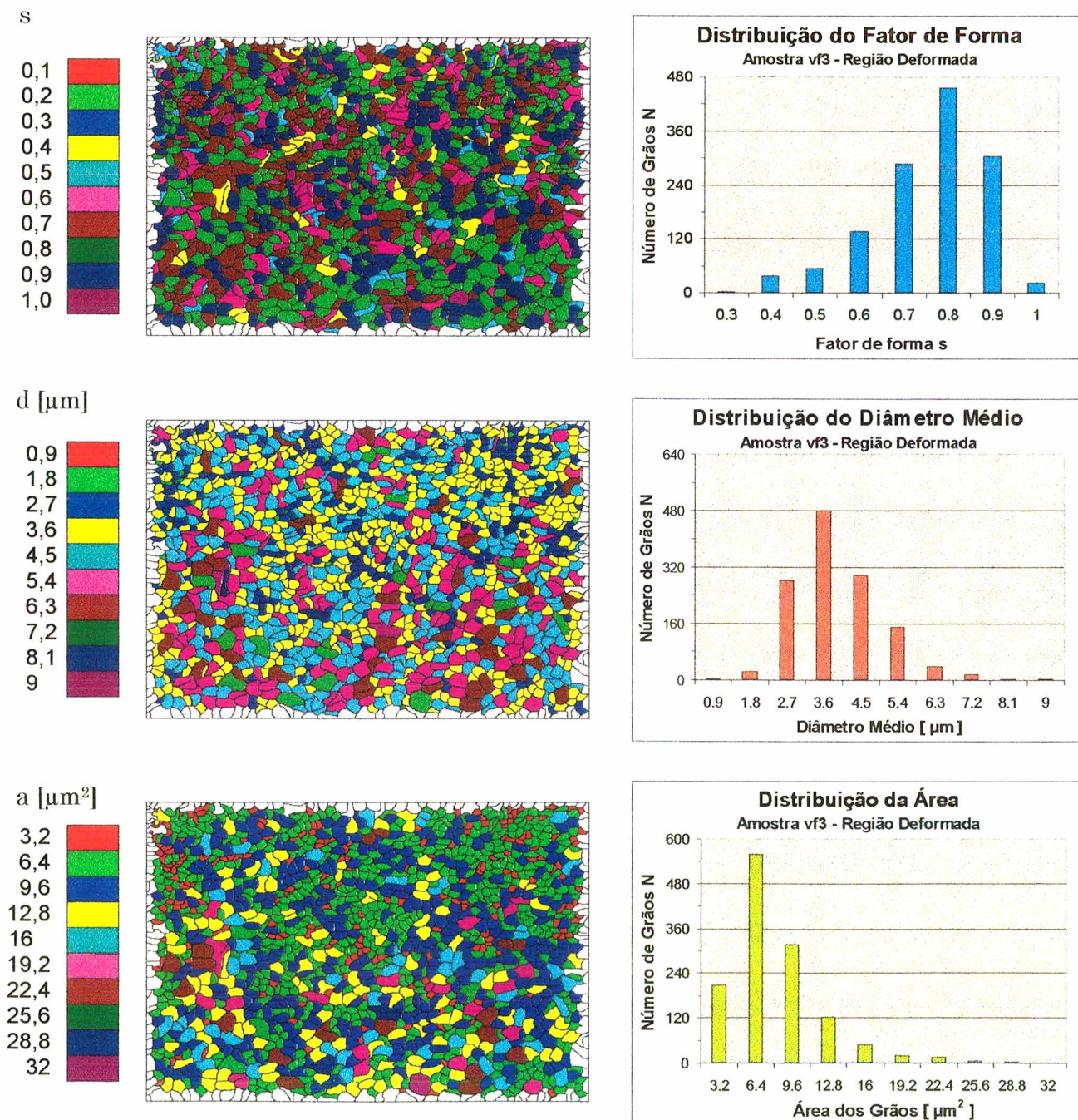


FIGURA 66 - Classificação e distribuição das variáveis s, d e a da amostra vf3.

7.6.3

Análise pela técnica do material recozido

Para a análise das amostras através da técnica do material recozido foi efetuado o recozimento do material aço SAE 1012, cuja micrografia é mostrada na figura 67.

Nesta micrografia pode-se observar os microconstituintes básicos deste aço baixo carbono: a matriz ferrítica, composta de grãos em cor mais clara, e os grãos perlíticos de cor escura. Como resultado do processo de recozimento, ocorreu nucleação da perlita nos contornos de ferrita. Na ampliação da área demarcada em vermelho, à esquerda na figura, também podem ser observadas as lamelas de perlita.

Para efeitos de comparação com o material original, laminado a quente, foi desenvolvida a análise computacional através de microscopia eletrônica de varredura. Na figura 68 são plotados os gráficos para as grandezas geométricas fator de forma, diâmetro médio e área dos grãos.

O aspecto principal observado nesta micrografia é a estrutura totalmente recristalizada, característica de um material recozido [30]. Na classificação por código de cores do fator de forma os grãos equiaxiais, com formato semelhante a um hexágono, se apresentam nas cores verde escuro e azul escuro.

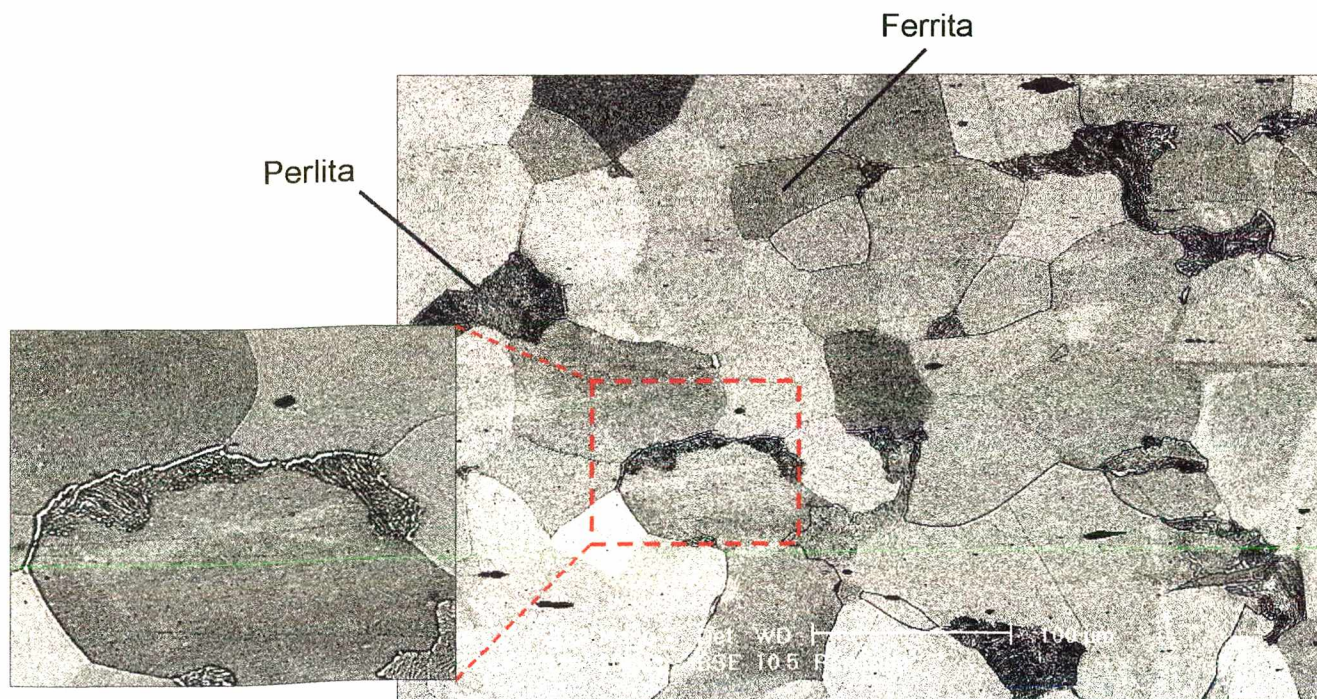


FIGURA 67 - Micrografia do aço SAE 1012 recozido (900°C - 6 h).

O tamanho de grão grosseiro nesta microestrutura é outra característica decorrente do recozimento. Isto refletiu-se na distribuição do diâmetro médio e da área dos grãos, que se situaram respectivamente na faixa de 51-85 μm e 1300-2600 μm^2 . Estes valores foram bastante superiores aos obtidos para o material no estado laminado a quente.

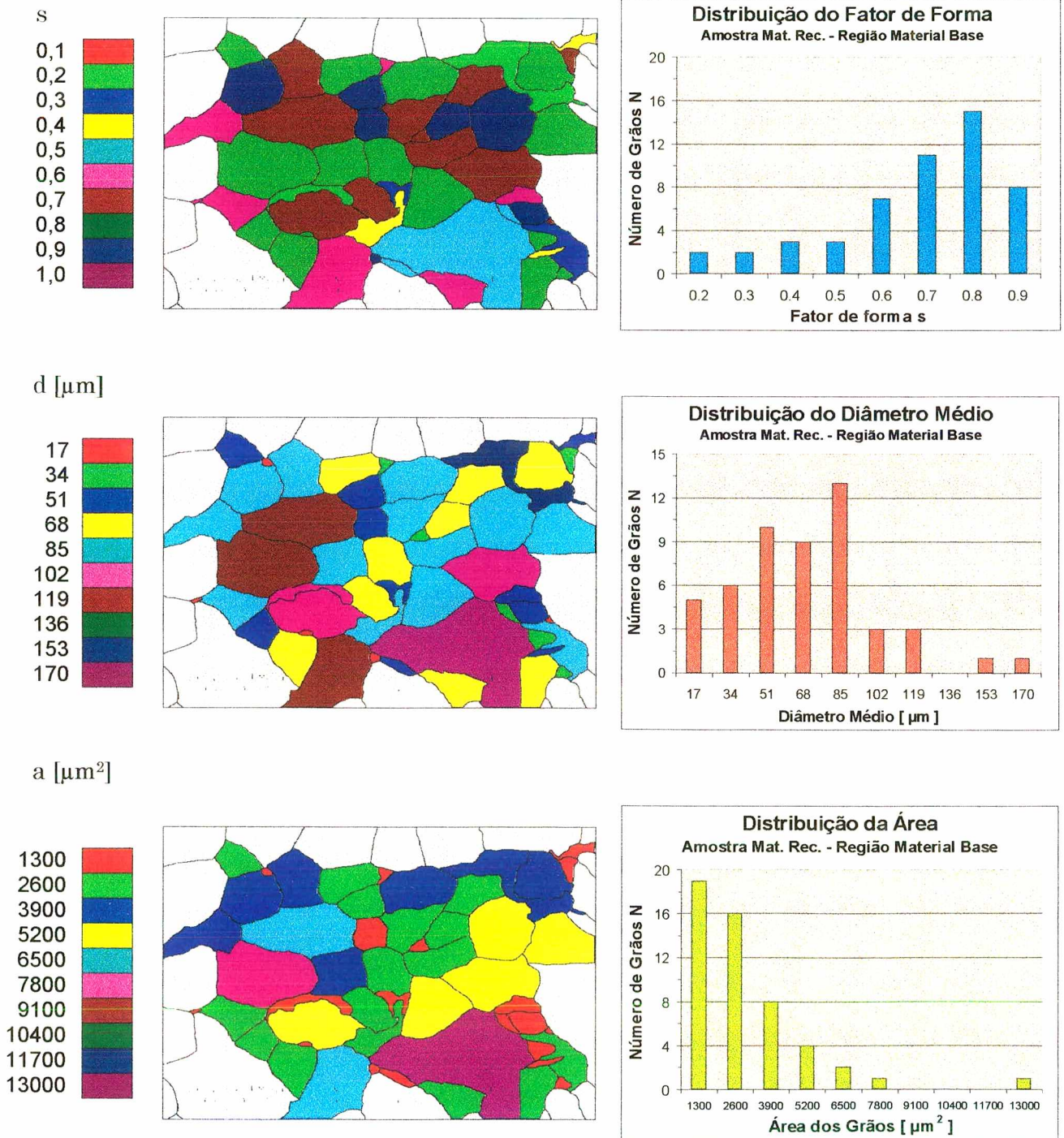


FIGURA 68 - Classificação e distribuição das variáveis s, d e a do material recozido.

Amostras com v_f constante

Para efeito comparativo, as micrografias das amostras 10300 e 10600 estão ilustradas lado a lado na figura 69.

No aspecto geral a condição 10300 apresenta uma microestrutura menos afetada termomecanicamente, em comparação com a condição 10600. Isto é evidenciado pela presença de estrutura perlítica grosseira na matriz ferrítica, na região mais deformada da amostra 10300, como ilustrado pela ampliação da área demarcada em vermelho.

Na amostra 10600 a dissolução da perlita na fase ferrítica pode ser observada claramente na ampliação em destaque à direita. Como ilustrado pelas setas na parte superior da figura, a distribuição de material nestas amostras foi diferenciada. Na amostra 10300 pode-se observar que 65% do material escoou em direção à superfície inferior da chapa. Já na amostra 10600 este percentual chegou a 70%.

Alguns problemas do uso desta técnica podem ser destacados nestas duas primeiras micrografias. A descarbonetação na superfície da chapa, decorrente do recozimento do material, e a distorção no comprimento da amostra 10600, que foi menor que o da amostra 10300, resultado inconsistente com aqueles obtidos com o material no estado normal.

Amostras com v_f variável

Na figura 70 são ilustradas as micrografias das amostras vf1 e vf2, produzidas com velocidade de avanço variável.

A característica marcante destas amostras refere-se à deformação da chapa produzida pela velocidade de avanço variável, devido ao baixo limite de escoamento do material recozido.

As amostras deste grupo sofreram uma influência térmica menos intensa, quando comparadas com as amostras 10300 e 10600. O estado da estrutura perlítica na região deformada das amostras vf1 e vf2 reflete este fato. Entretanto, a amostra vf2 apresenta indícios de rearranjo da perlita na matriz ferrítica.

Como a observação da distribuição do material foi prejudicada pela deformação sofrida pela chapa, não há evidências de que em alguma das amostras uma maior parcela de material escoou para a superfície inferior do que a outra.

Outro aspecto que pode ser observado refere-se à forma da bucha vf1, mais curta e de parede mais espessa, em comparação com as amostras 10300 e 10600, resultado portanto compatível com as amostras produzidas com material laminado a quente.

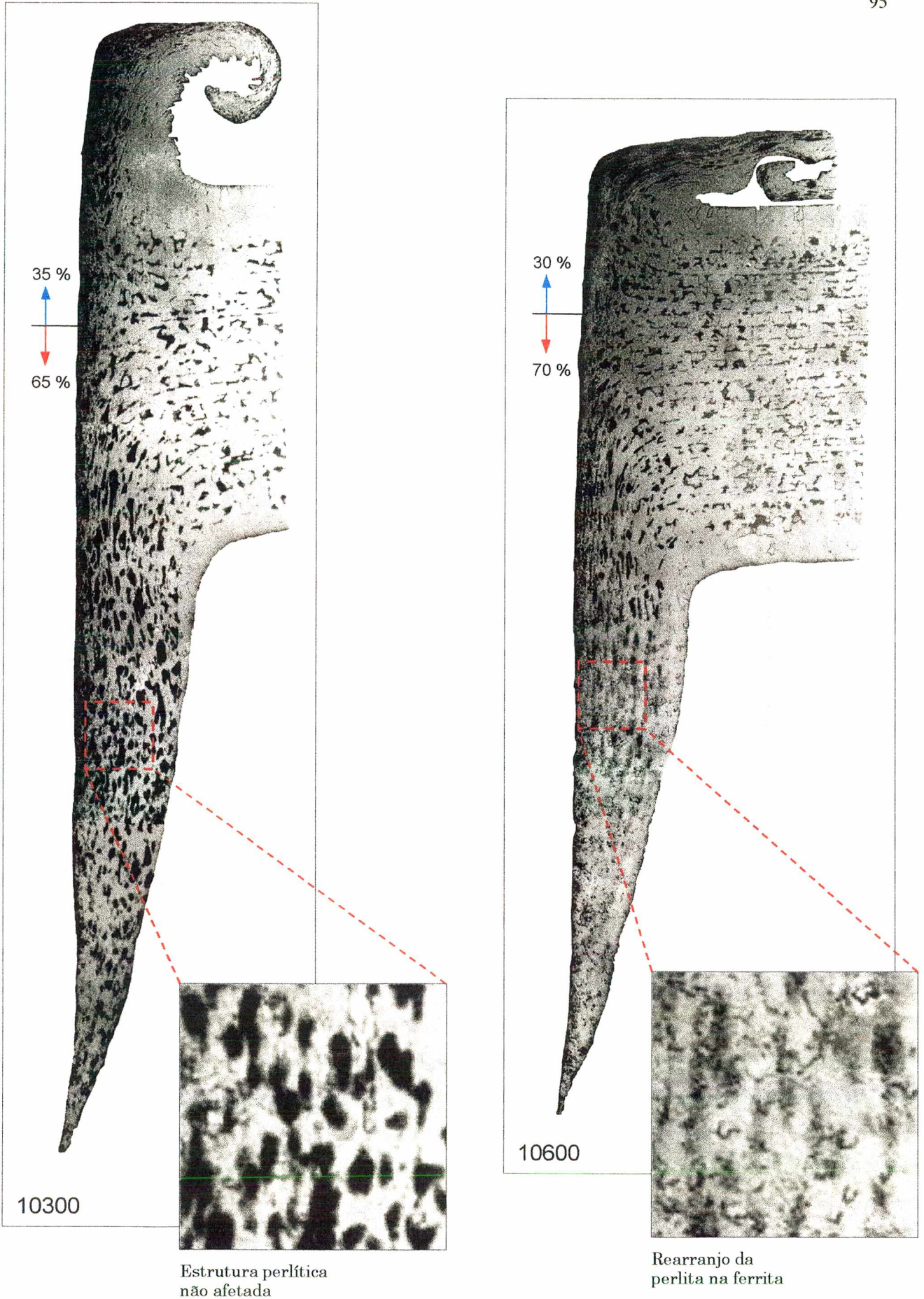


FIGURA 69 – Micrografias com material recozido das amostras 10300 e 10600.

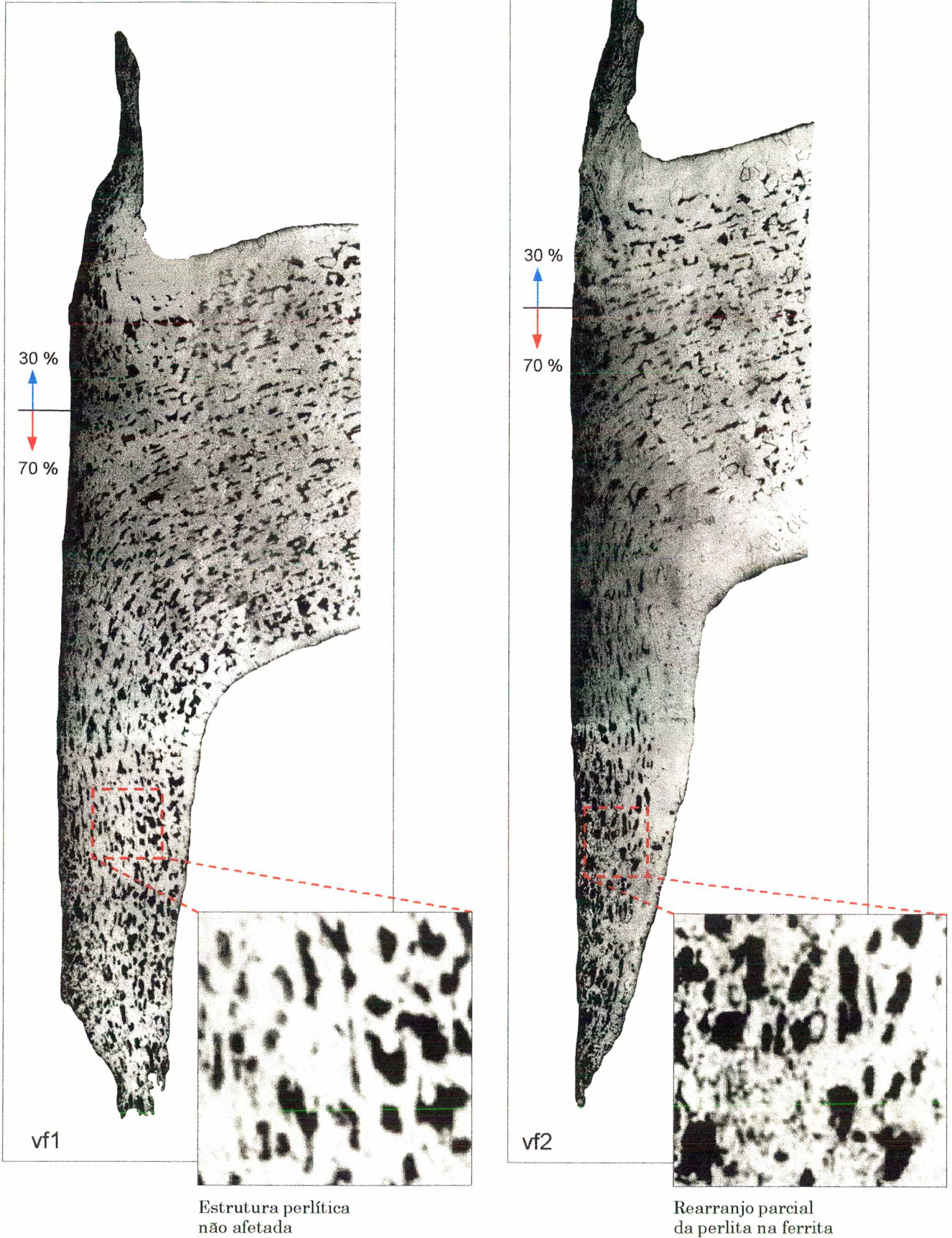
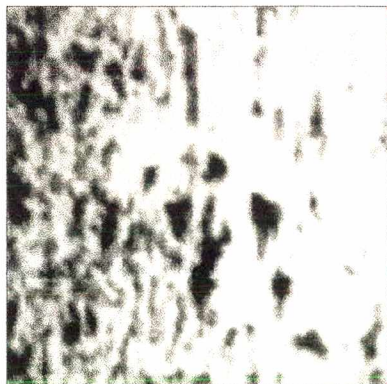


FIGURA 70 – Micrografias com material recozido das amostras vf1 e vf2.

Amostras com rotação e v_f variáveis

Na figura 71 é apresentada a micrografia com material recozido da amostra vf3. Além da característica de deformação da chapa, a descarbonetação do material em função do processo de recozimento é particularmente intensa na superfície do corpo de prova.

De forma semelhante à amostra vf2, o rearranjo da perlita na matriz ferrítica demonstra que o material nesta região da amostra vf3 sofreu uma certa influência termomecânica. Pode-se afirmar, entretanto, que esta foi de menor intensidade que a ocorrida na amostra vf2. A distribuição de material também não difere muito da encontrada na amostra vf2.



Indícios de rearranjo da perlita na ferrita

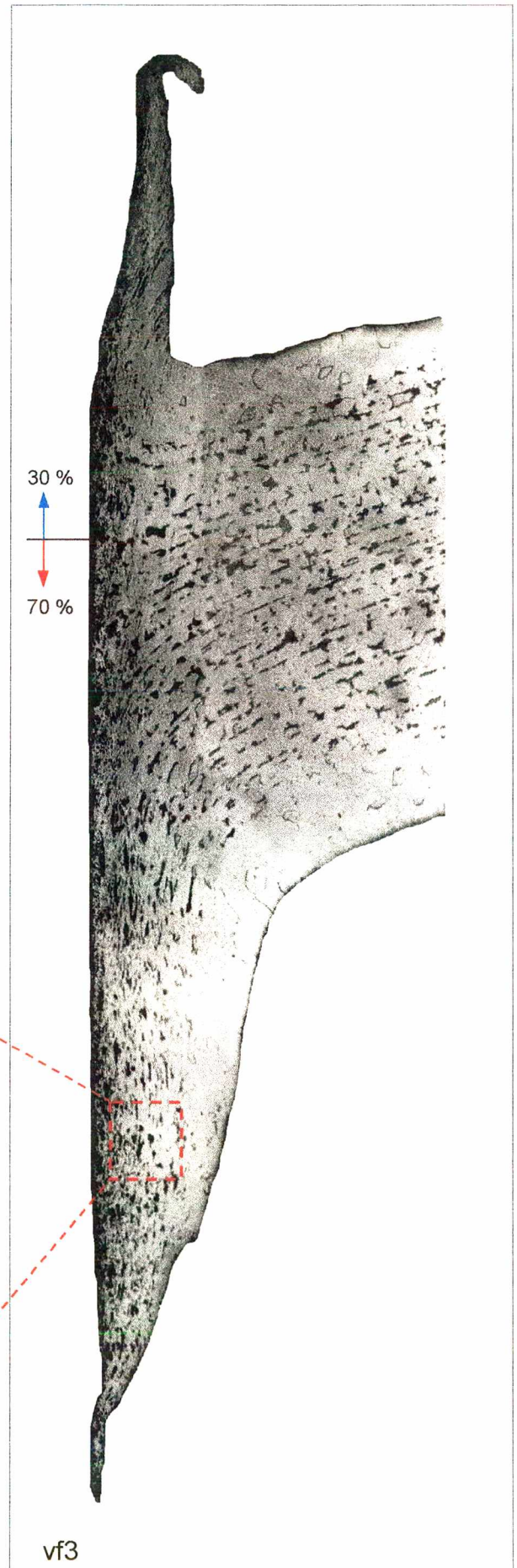


FIGURA 71 – Micrografia com material recozido da amostra vf3.

7.6.4 Medição de microdureza HV 0,1

Para efeitos de comparação com as medições de microdureza da região deformada, foram feitas medições de microdureza fora da ZTA, no material base, das quais foi obtido o valor médio de 163 HV. Para o material utilizado nos ensaios, aço com porcentagem de carbono de 0,11%, este valor é compatível com o estado do material laminado a quente [30].

Amostras com v_f constante

Nas figuras 72 e 73 estão ilustrados os diagramas com os perfis de microdureza das amostras 10300 e 10600.

Analisando a amostra 10300, nas curvas da região da altura da chapa, entre 1-3 mm de distância da superfície superior, observa-se que há um aumento na microdureza da borda do furo, comportamento equivalente ao observado por Müller-Kraus [1]. Nesta região, próximo à borda, os valores situaram-se em torno de 200 HV, aproximadamente 20% maiores do que no material base.

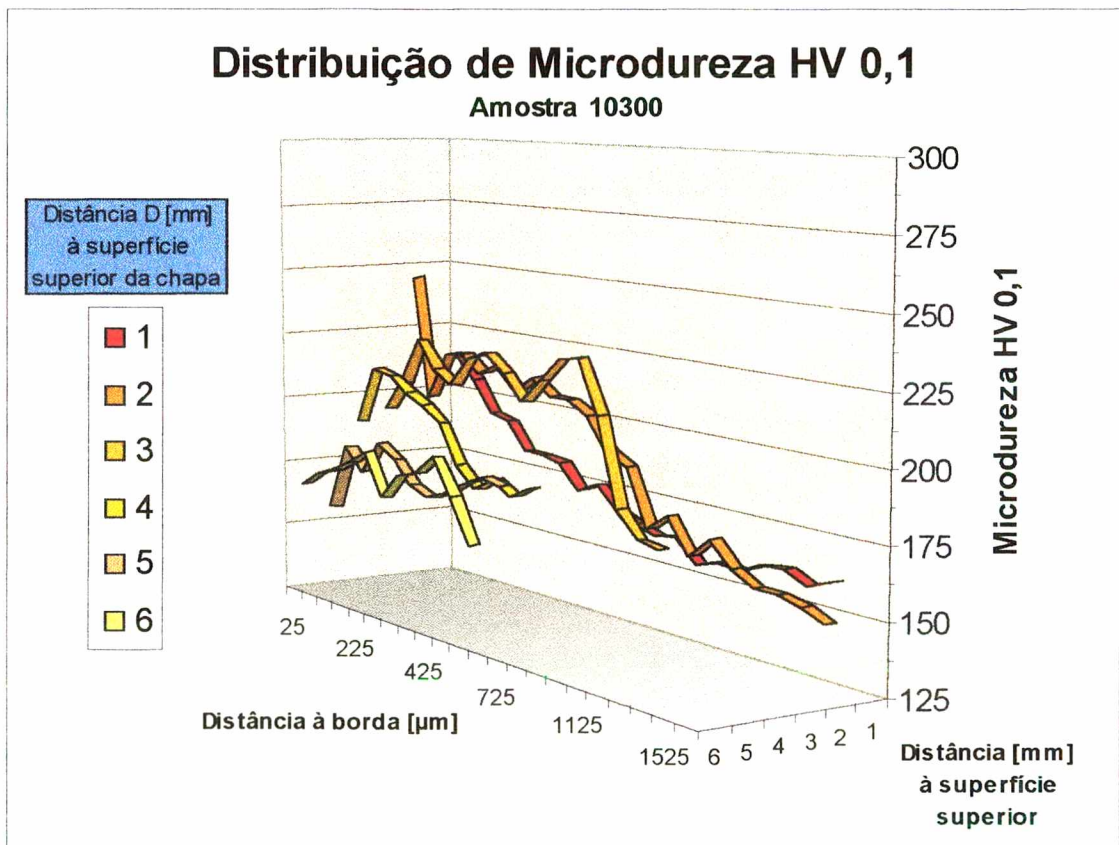


FIGURA 72 - Medições de microdureza HV 0,1 na amostra 10300.

Em direção à região mais deformada da bucha houve uma redução da microdureza, como mostrado pelas curvas em cor mais clara no diagrama, onde foram medidos valores em torno de 150-170 HV, praticamente da mesma ordem de grandeza do material base.

A amostra 10600 apresentou comportamento semelhante na região superior da bucha, onde se manteve o perfil de diminuição de microdureza em direção ao material base. Observa-se, entretanto, que o aumento da microdureza na borda da bucha foi menos intenso, em comparação com a amostra 10300.

Ao contrário da amostra anterior, os valores da região mais deformada da amostra 10600 foram mais elevados que os da região superior, atingindo em alguns pontos valores da ordem de 200 HV.

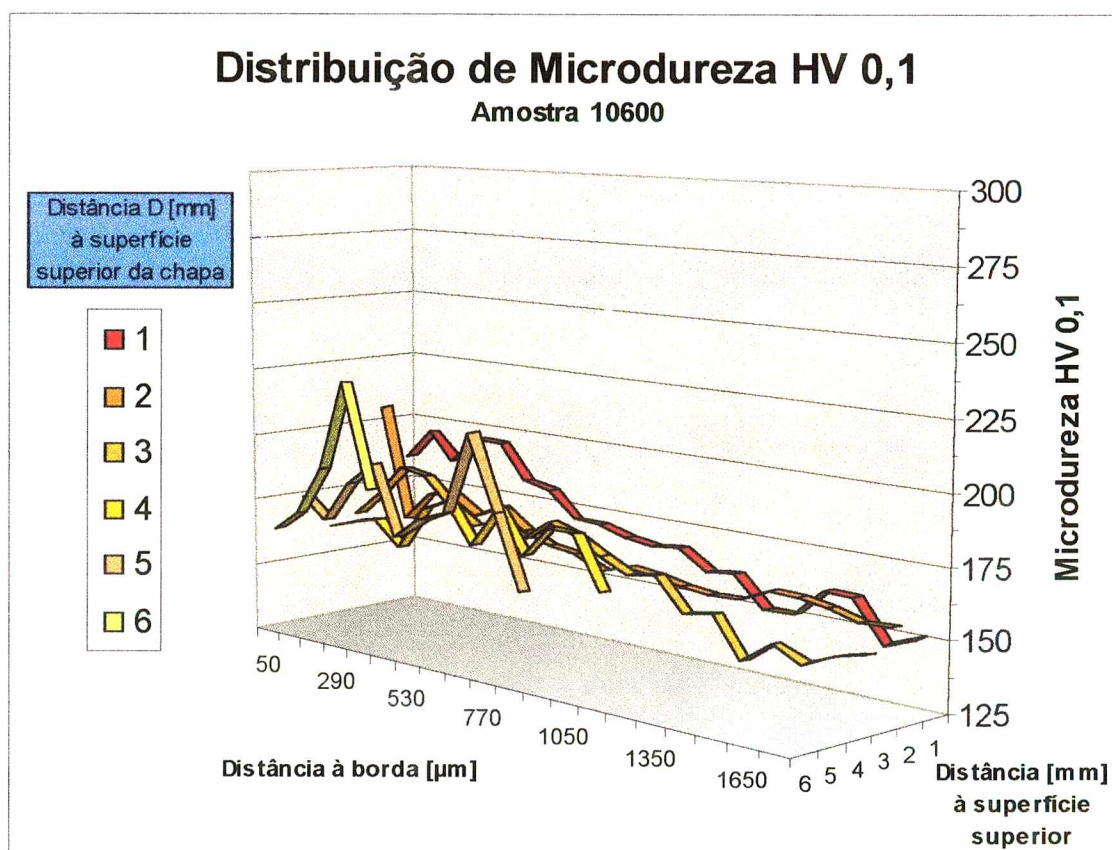


FIGURA 73 - Medições de microdureza HV 0,1 na amostra 10600.

Nestes dois primeiros diagramas pode-se observar localmente a presença de uma variação das medições em alguns pontos, devido provavelmente a heterogeneidades da microestrutura.

Amostras com v_f variável

Os diagramas com os perfis de microdureza das amostras vf1 e vf2 são apresentados nas figuras 74 e 75, respectivamente.

O mesmo perfil de microdureza observado nas amostras anteriores também é encontrado na região superior da amostra vf1, entre 1 e 3 mm distante da superfície superior. A particularidade desta amostra está nos valores extremamente elevados próximos à borda da bucha, com aumentos de 30-40% em relação ao material base observado nesta região. Na zona de deformação mais intensa da bucha a microdureza atingiu valores da mesma ordem de grandeza do material base, em torno de 170 HV.

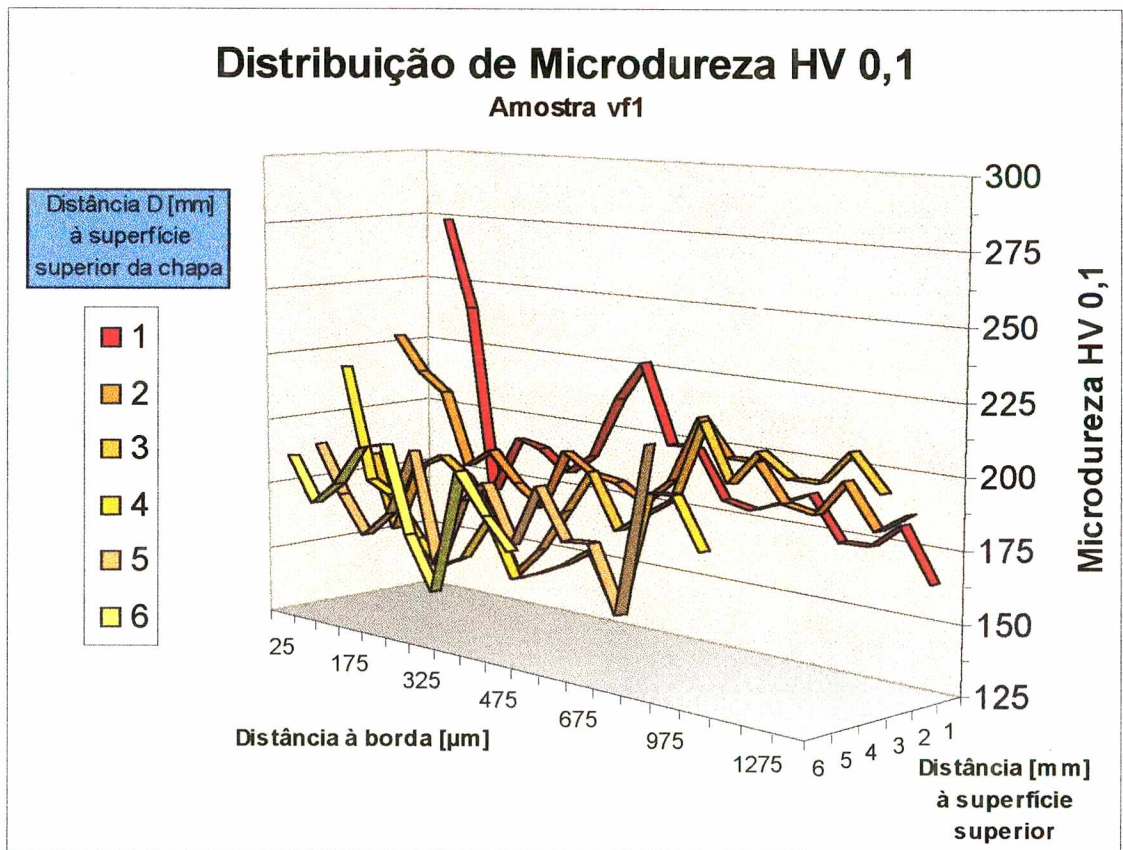


FIGURA 74 - Medições de microdureza HV 0,1 na amostra vf1.

A amostra vf2 apresentou um comportamento diferente dos observados até agora. Em pontos mais afastados da borda da bucha, os valores situaram-se na faixa de 200 HV, ligeiramente mais elevados que os da amostra vf1.

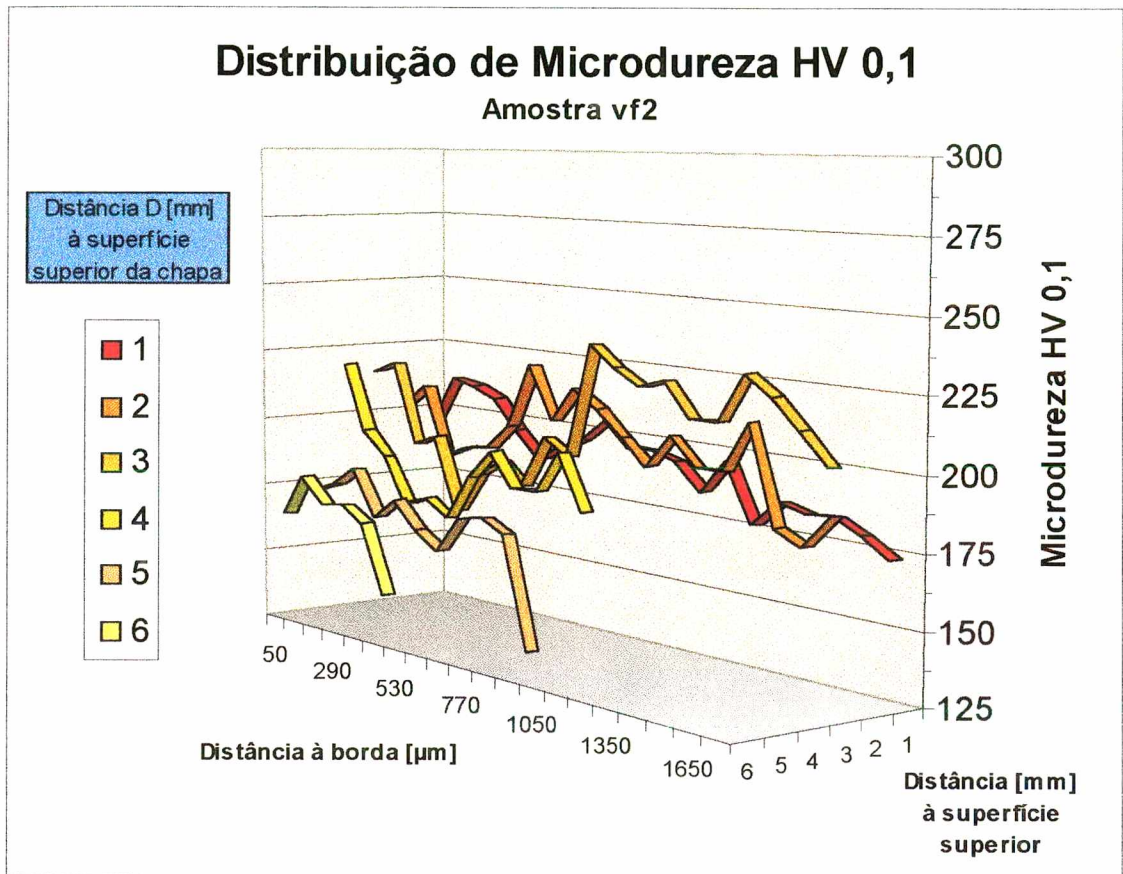


FIGURA 75 - Medições de microdureza HV 0,1 na amostra vf2.

Os perfis da região inferior da amostra apresentaram valores inferiores, do mesmo modo como a amostra vf1, equivalentes à ordem de grandeza do material base.

Nos perfis de microdureza destas amostras produzidas com v_f variável há uma diferenciação menor da região superior para a região mais deformada, em comparação com as amostras 10300 e 10600. No geral, as amostras com v_f variável apresentaram valores ligeiramente mais elevados do que as amostras com v_f constante, principalmente na região da borda da bucha.

Amostras com rotação e v_f variável

Na figura 76 é apresentado o diagrama com as curvas de microdureza da amostra vf3. A característica principal do perfil de microdureza desta amostra refere-se ao comportamento homogêneo das curvas ao longo de toda a amostra. Pode-se observar nitidamente no diagrama a forma padrão do perfil. Valores mais elevados, da ordem de 200-

250 HV na borda da bucha, diminuem cerca de 30% na região adjacente, em direção ao material base.

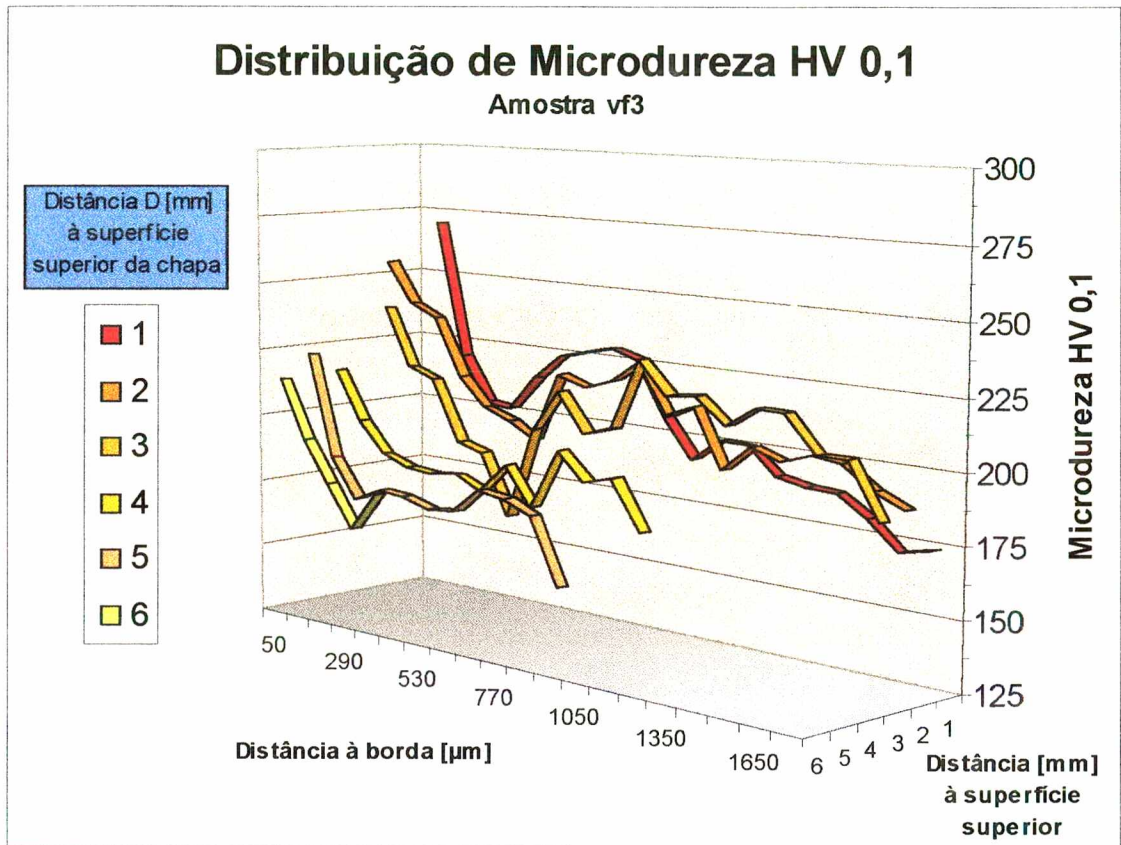


FIGURA 76 - Medições de microdureza HV 0,1 na amostra vf3.

Próximo ao material base os valores obtidos tendem gradualmente ao valor médio encontrado para o material base.

Embora este perfil de microdureza também tenha se mantido na região deformada desta amostra, nesta região ocorreu uma nítida diminuição dos valores medidos.

Em comparação às amostras anteriores, a amostra vf3 foi a que apresentou os valores mais elevados na borda. Do mesmo modo, foi também a que apresentou os perfis mais constantes, de comportamento mais homogêneo.

7.7 Resistência à Tração

Com o objetivo de avaliar visualmente a repetibilidade alcançada nos ensaios de cada amostra, os resultados dos três ensaios de cada condição foram plotados no mesmo diagrama.

Em cada diagrama também é apresentado o valor médio da carga de ruptura das três repetições, bem como o valor do desvio-padrão das medições.

Nas figuras 77 e 78 são apresentados os estados dos filetes da bucha roscada antes e depois do ensaio de tração, respectivamente.

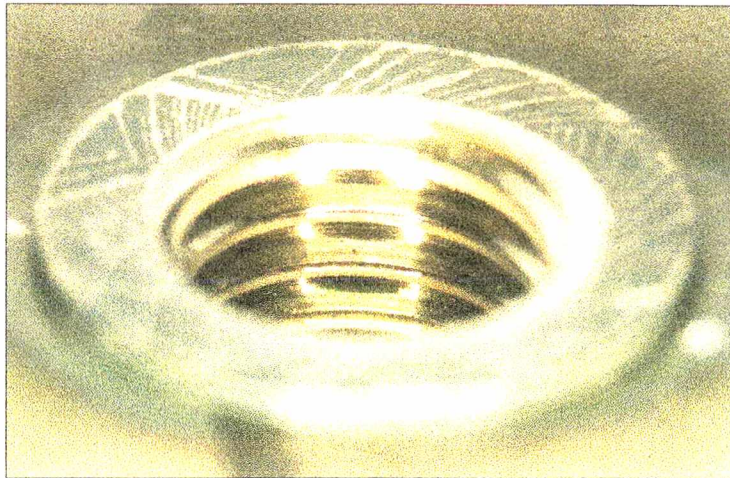


FIGURA 77 - Estado da bucha roscada antes do ensaio de tração.



FIGURA 78 - Estado da bucha roscada após o ensaio de tração.

Na foto anterior pode ser observada a ruptura completa dos filetes após a tração do corpo de prova. As linhas da rosca na parte inferior da bucha mostram que os filetes mais inferiores não foram completamente formados.

7.7.1

Ensaio de resistência à tração

Amostras com v_f constante

Nas figuras 79 e 80 são ilustrados os diagramas de resistência à tração [kN] pelo deslocamento [mm] das amostras 10300 e 10600, respectivamente.

Analisando os valores de resistência à tração $F_{K \text{ Máx MED}}$ e do desvio-padrão σ de ambos os diagramas verifica-se uma equivalência na resistência à tração destas amostras. Para a amostra 10300 a $F_{K \text{ Máx MED}}$ foi de 40,98 kN, enquanto que na amostra 10600 este valor atingiu 40,68 kN.

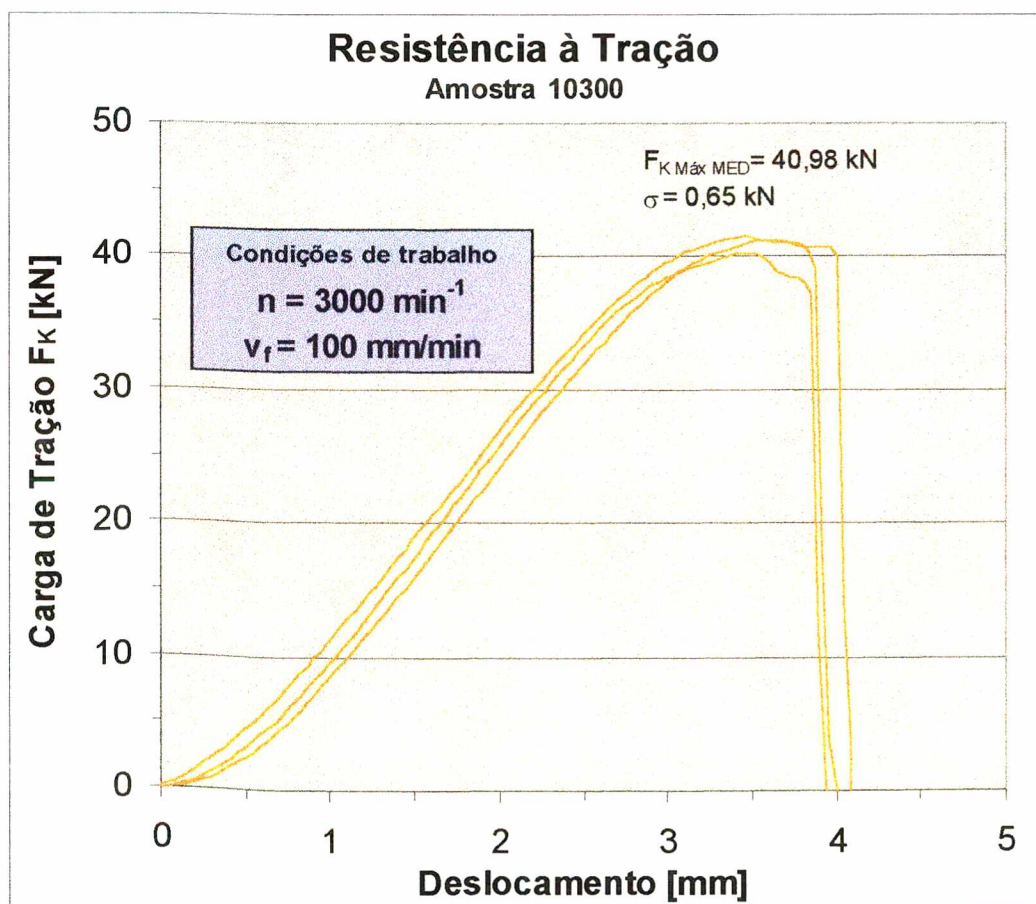


FIGURA 79 – Curvas de resistência à tração da amostra 10300.

Como os valores de desvio-padrão destas amostras foram 0,65 e 0,38, respectivamente, pode-se afirmar que não há diferença significativa entre estas duas amostras.

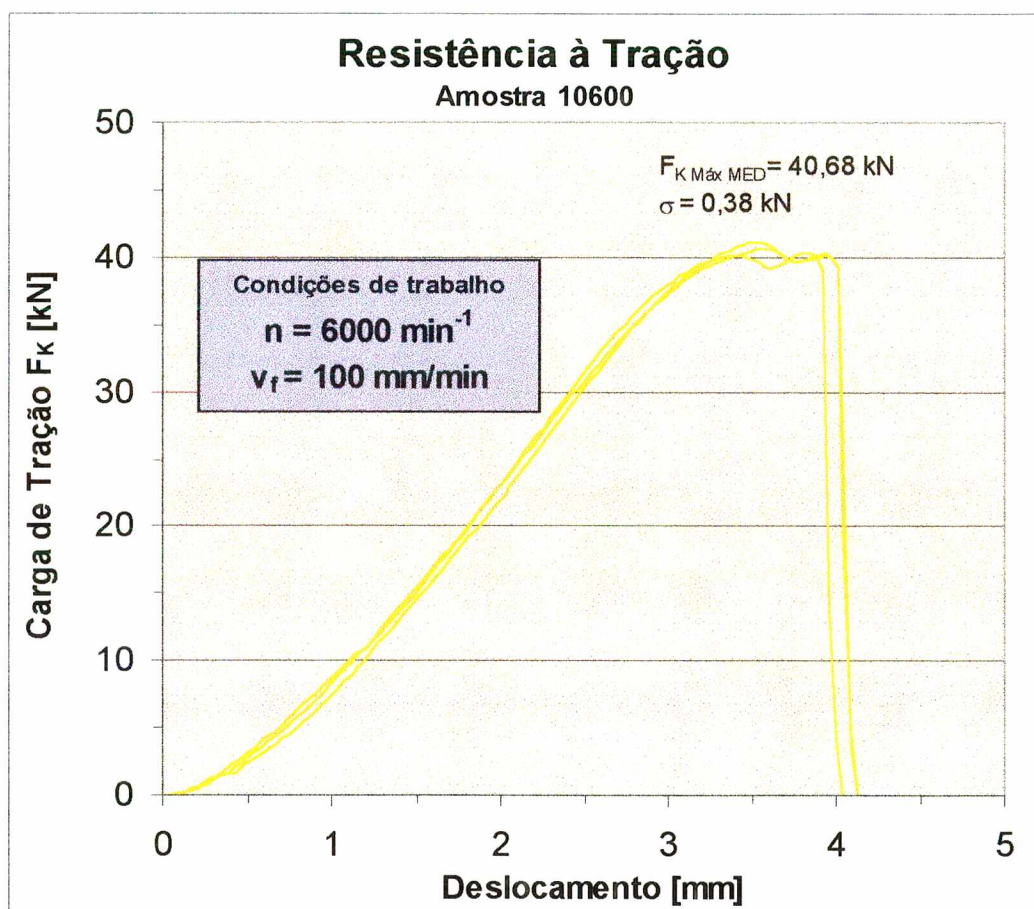


FIGURA 80 - Curvas de resistência à tração da amostra 10600.

Amostras com v_f variável

As curvas de resistência à tração das amostras v_{f1} e v_{f2} são ilustradas nas figuras 81 e 82.

A amostra v_{f1} apresentou resistência à tração máxima média da ordem de 44,44 kN, mais elevada que a da amostra v_{f2} , que alcançou o valor de 42,05 kN. Os valores de desvio-padrão das amostras situaram-se na mesma ordem de grandeza das amostras com v_f constante, alcançando 0,46 kN na amostra v_{f1} e 0,53 na amostra v_{f2} . Isto significa que a repetibilidade entre as amostras se manteve praticamente constante.

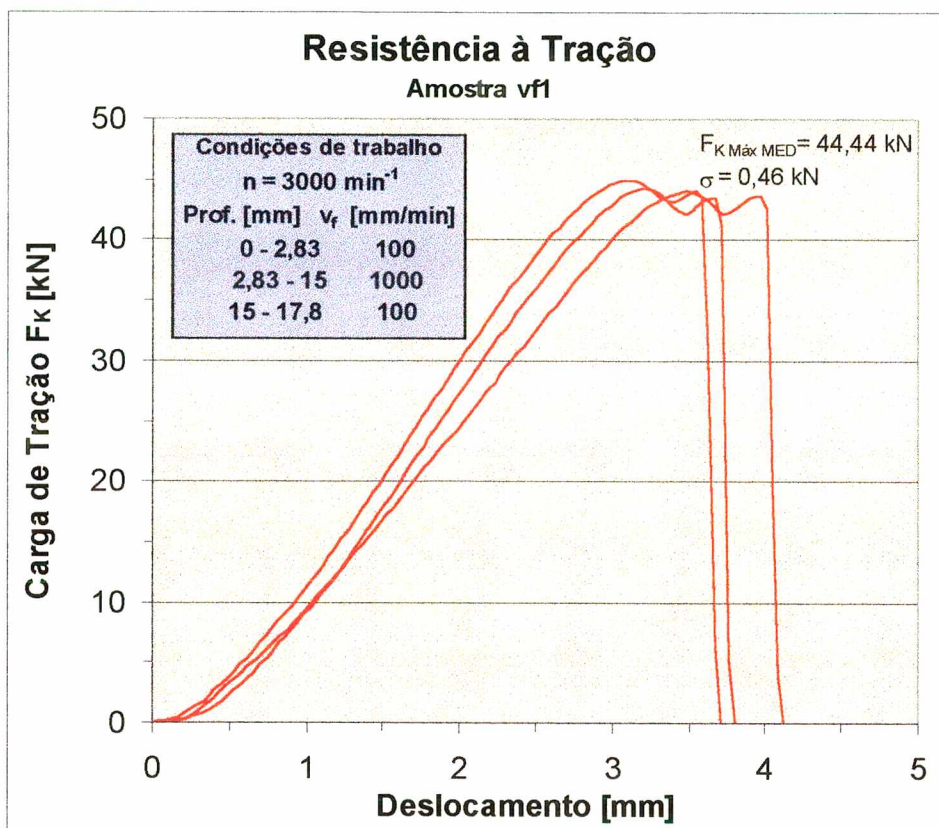


FIGURA 81 - Curvas de resistência à tração da amostra vf1.

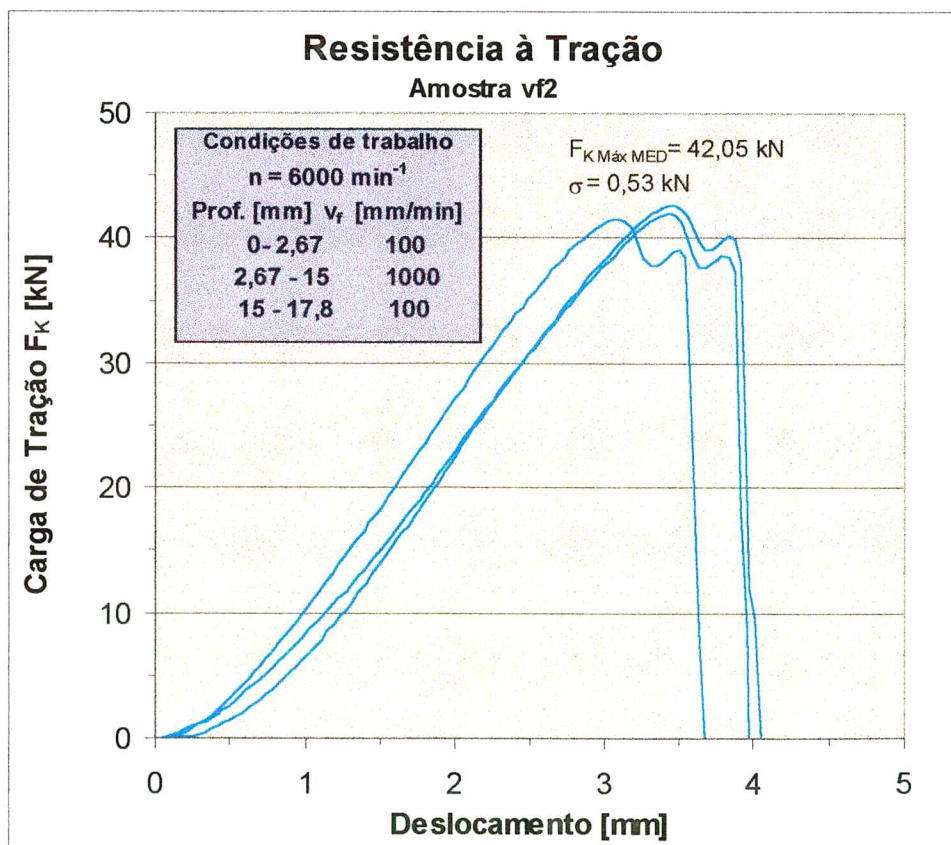


FIGURA 82 - Curvas de resistência à tração da amostra vf2.

Comparando-se os resultados com o primeiro grupo de amostras, percebe-se que as condições da amostra vf2 resultaram em valores de resistência à tração cerca de 5% maiores. Já o nível de resistência alcançado pela amostra vf1 foi de até 10% mais elevado que o das amostras 10300 e 10600.

Amostra com rotação e vf variáveis

O diagrama de carga de tração F_K pelo deslocamento da amostra vf3 é apresentado na figura 83.

O valor médio da carga de ruptura alcançada por esta amostra foi da ordem de 42,15 kN, aproximadamente o valor obtido pela amostra vf2. O desvio-padrão das repetições foi relativamente alto, da ordem de 1,04 kN, aproximadamente 100% maior que as amostras anteriores.

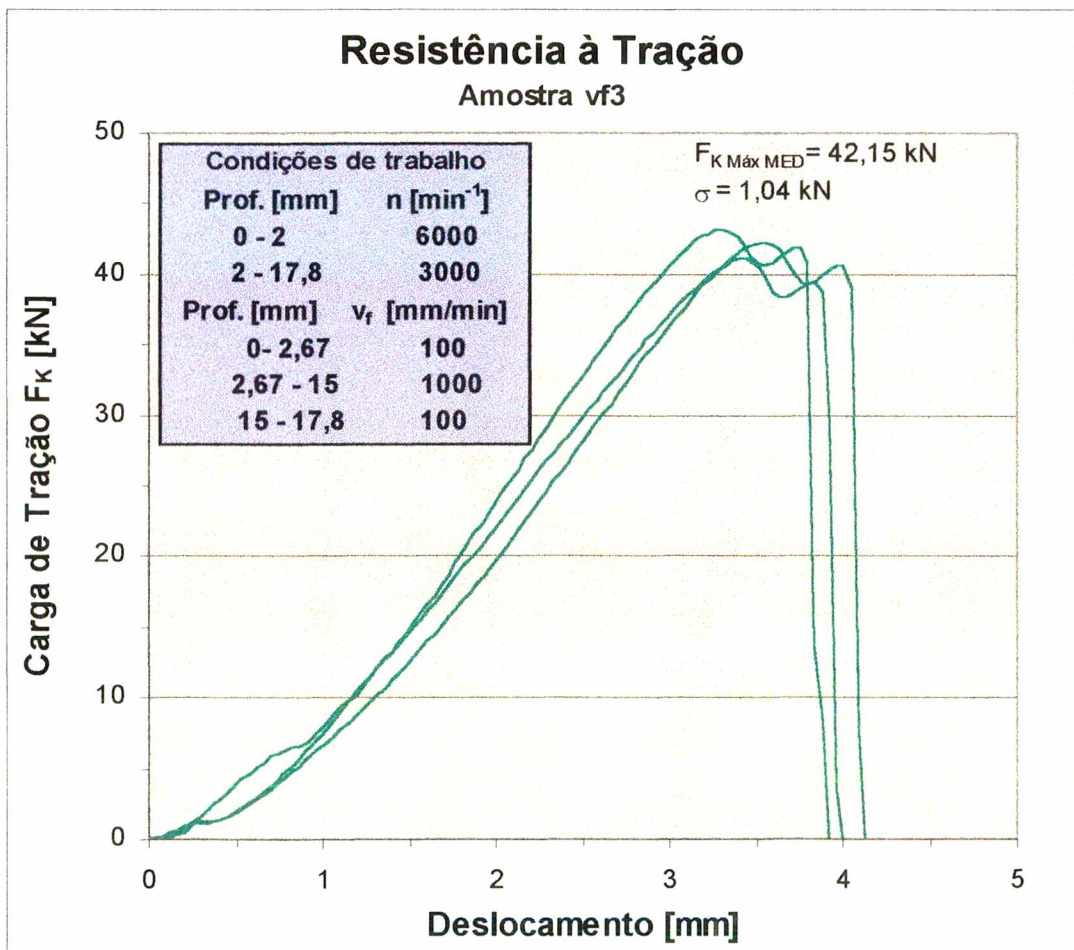


FIGURA 83 – Curvas de resistência à tração da amostra vf3.

O nomograma da figura 84 mostra uma visão geral da resistência à tração das 5 condições aqui estudadas. No geral as amostras com v_f variável apresentaram valores mais elevados que as amostras com velocidade de avanço constante.

O maior valor médio da carga de resistência à tração foi alcançado pela amostra v_f1 , produzida com 3000 min^{-1} de rotação, aproximadamente 10% maior que o valor alcançado pelas amostras 10300 e 10600.

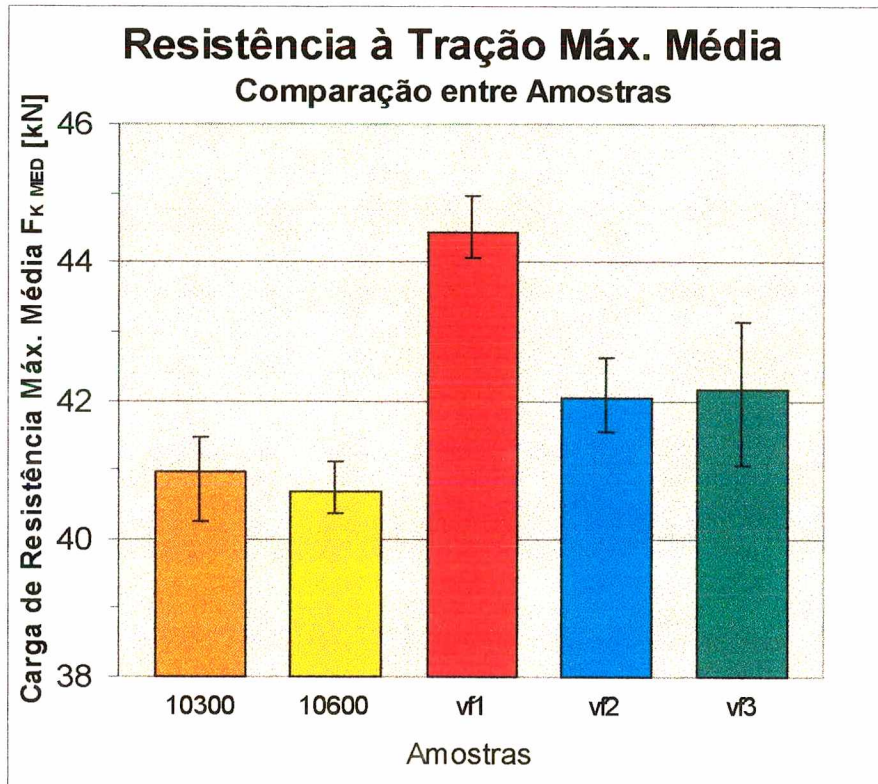


FIGURA 84 – Valores médios de resistência à tração das amostras analisadas.

Nesta representação pode-se observar, através do intervalo de variação plotado junto aos nomogramas, que a repetibilidade se manteve praticamente constante, com variação da ordem de 3% dos valores medidos. A exceção ficou com a amostra v_f3 , que apresentou uma variação de 5% nos resultados.

7.7.2

Ensaio de classes de resistência

Os resultados dos ensaios para a determinação das classes de resistência, segundo a norma DIN 267, parte 4, estão listados na tabela 9.

TABELA 9 – Classes de resistência das amostras analisadas [22].

Amostra	Classe de Resistência alcançada	Carga de Teste correspondente [N]
10300	8	29000
10600	8	29000
vf1	10	36500
vf2	10	36500
vf3	10	36500

As amostras com v_f constante (10300 e 10600) atingiram a classe 8, cuja carga de teste é correspondente da ordem de 29 kN. Pode-se observar nos gráficos de resistência à tração destas amostras que uma carga desta magnitude situa-se bastante abaixo do campo de deformação permanente. Os testes com a carga de 36,5 kN permitiriam a classificação de alguns experimentos da amostra 10300 como classe 10, cumprindo as exigências da norma DIN. Como este fato não foi repetido em todas os ensaios na condição 10300, optou-se a favor da segurança em classificar as amostras desta condição também com a classe 8.

Com v_f variável todas as amostras chegaram a atingir a classe 10, com carga de teste de 36,5 kN, devido à resistência à tração mais elevada deste grupo de amostras.

8 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

8.1 Força de Avanço, Momento Torçor e Potência

Do ponto de vista de solicitação dos elementos da máquina-ferramenta através de $Ff_{máx}$ as amostras com v_f constante foram as que resultaram nos menores valores, abaixo de 4000 N. Nestas amostras foram alcançados os maiores valores de temperatura na bucha durante o processo, na faixa de 820-900 °C, que diminuiu o limite de escoamento do material a um estado de maior plasticidade [27]. Nesta condição o material ofereceu menor resistência à penetração da ferramenta, o que resultou em níveis mais baixos de $Ff_{máx}$.

Nas amostras 10300 e 10600 o momento torçor máximo obtido foi menor que o alcançado para as amostras com v_f variável, em função da maior quantidade de energia térmica (maior temperatura) alcançada nestas amostras. A potência mínima consumida, que depende diretamente de $Mt_{máx}$, situou-se, nestas amostras, ligeiramente acima de 1 kW, o que não representou nenhum risco ao acionamento da máquina [09].

Com o uso de velocidade de avanço variável verifica-se a elevação de 35% (amostras com $n = 6000 \text{ min}^{-1}$) na $Ff_{máx}$ e de até 145% (amostras com 3000 min^{-1}) no $Mt_{máx}$ (figuras 42 e 43), características da mudança na resistência do material em função do aumento da velocidade de avanço [14]. Com a aceleração da ferramenta, o material teve um aquecimento menor que o primeiro grupo de amostras. Os valores de temperatura foram mais baixos, na faixa de 500 °C a 750 °C, não ocasionando a diminuição do limite de escoamento do material para os mesmos níveis das amostras com v_f constante.

A maior resistência mecânica observada nas amostras com v_f variável também se refletiu na potência consumida, que atingiu valores da ordem de 3 kW, mais do que o dobro do valor alcançado pelas amostras 10300 e 10600. Ainda assim, este valor de potência também não ofereceu risco de sobrecarga, já que a potência de acionamento disponível na máquina-ferramenta era de 15 kW [38].

A amostra $vf3$ apresentou um comportamento semelhante à amostra $vf1$, obtendo-se valores de $Ff_{máx}$, $Mt_{máx}$ e potência da mesma ordem de grandeza. Isto pode ser explicado pelo fato de que tanto o trabalho de conformação da amostra $vf3$, como o seu valor máximo de temperatura médio (515 °C) situam-se no mesmo patamar da amostra $vf1$.

8.2 Trabalho de Conformação

A análise da introdução de energia mecânica no processo, através do trabalho de conformação deve ser desenvolvida com base em dois aspectos principais: (i) quantidade de energia aplicada; (ii) o tempo de aplicação da mesma.

Observando primeiramente a rotação, responsável pela maior parcela de energia fornecida à conformação do material [2], verifica-se que as amostras com 6000 min⁻¹ (10600 e vf2) foram as que receberam uma maior quantidade de energia termomecânica, em comparação com amostras de seu próprio grupo, como mostrado na tabela 6, da página 67.

Analisando pelo aspecto do tempo de realização do trabalho de conformação, nas amostras com v_f constante o tempo principal foi aproximadamente o dobro das amostras com v_f variável, tabela 8, página 74, devido à velocidade de avanço. Nas amostras 10300 e 10600 foi fornecido, portanto, aproximadamente duas vezes mais energia do que nas amostras com v_f variável, por um tempo duas vezes mais longo.

Comparando as amostras de v_f constante com as produzidas com v_f variável, verifica-se que as primeiras receberam uma maior parcela de energia, cujo fluxo se estendeu por um tempo mais longo, isto é, estas amostras sofreram uma influência termomecânica mais intensa. Nas amostras vf1, vf2 e vf3 foi introduzida uma parcela de energia mecânica menor, que atuou por um tempo mais curto, resultando em uma solicitação termomecânica menos significativa.

8.3 Temperatura da Bucha

Na análise da temperatura atingida na bucha pode-se observar um comportamento bastante distinto entre as amostras com v_f constante (10300 e 10600) e as amostras com v_f variável (vf1, vf2 e vf3).

Nas amostras 10300 e 10600 foram atingidos os valores mais elevados de temperatura, que se situaram na faixa de 820-900 °C, em função basicamente do maior tempo de processo destas amostras, que permitiu que o material sofresse um maior aquecimento [21]. Neste grupo percebe-se uma leve tendência do aumento de temperatura devido ao uso de rotação mais elevada, que ao introduzir maior quantidade de energia

através do trabalho de deformação resultaria em um aquecimento mais intenso. Esta tendência pode ser percebida observando os valores de temperatura em geral mais elevados no gráfico da amostra 10600 (figura 46, página 69). Entretanto, a pequena diferença de $T_{Máx\ MED} = 868\text{ °C}$ (10300) e $T_{Máx\ MED} = 888\text{ °C}$ (10600), com valores de desvio-padrão da ordem de 38 °C e 21 °C , respectivamente, não permite uma maior diferenciação entre estas amostras.

Nas amostras com v_f variável o tempo de processo foi mais curto, não permitindo o mesmo aumento de temperatura do material observado nas amostras 10300 e 10600.

Nas amostras $vf1$ e $vf2$ pode-se caracterizar a influência da rotação nas curvas de temperatura, páginas 70 e 71. Na amostra $vf2$ o uso de 6000 min^{-1} proporcionou aquecimento da ordem de $700\text{-}750\text{ °C}$, enquanto que na amostra $vf1$, produzida com 3000 min^{-1} , os valores situaram-se na faixa de $500\text{-}650\text{ °C}$.

Este fato pode ser explicado pela rapidez com que as amostras com v_f variável são conformadas. Como a introdução de energia pelo trabalho de rotação na amostra $vf1$ é menor em função da rotação mais baixa, como pode ser observado na tabela 6, página 67, esta não possibilita o aquecimento num curto intervalo de tempo, que é limitado pela aceleração da velocidade de avanço.

A amostra $vf3$ novamente apresentou comportamento semelhante ao da amostra $vf1$, alcançando valores de temperatura da mesma faixa, entre $470\text{-}580\text{ °C}$. Esta paridade nos resultados pode ser explicada em função da quantidade de trabalho de conformação realizado, que foi da mesma ordem de grandeza.

Analisando o comportamento do gradiente de temperatura de todas as amostras percebe-se basicamente a influência da velocidade de avanço variável.

Em comparação com as amostras com v_f variável as amostras 10300 e 10600 apresentaram velocidades de aquecimento mais baixas e taxas de resfriamento mais altas.

O gradiente de aquecimento mais elevado observado nas amostras $vf1$, $vf2$ e $vf3$ pode ser atribuído à maior deformação imposta no início do processo, quando a ferramenta é acelerada. O aumento quase instantâneo da velocidade de avanço deforma o material intensamente, que se aquece rapidamente, levando a um maior gradiente de temperatura.

As maiores taxas de resfriamento das amostras 10300 e 10600, em média da ordem de -100 °C/s , ocorreram devido aos maiores valores de temperatura alcançados por estas amostras, em comparação com as amostras com v_f variável. Temperaturas mais elevadas na bucha acarretam a uma diferença de temperatura instantânea maior em relação ao resto da chapa, fazendo com que o calor seja conduzido mais rapidamente para a região adjacente ao furo, levando a um resfriamento mais rápido [39].

Nas amostras 10300 e 10600 observa-se uma semelhança também no gradiente de aquecimento, cuja dispersão de valores se situou na faixa de 230-320 °C/s, indicando pouca influência da rotação nesta etapa do processo.

Estes valores foram consideravelmente maiores do que aqueles observados por Kals [21], devido à baixa rotação utilizada nos seus experimentos, que levou a temperaturas mais baixas e portanto a menores taxas de transferência de calor durante o processo.

Comparando a amostra vf1 ($\Delta T_{\text{Máx MED}} = 511$ °C/s) com a amostra vf2 ($\Delta T_{\text{Máx MED}} = 919$ °C/s), percebe-se que o uso de rotação mais alta aumenta fortemente a velocidade de aquecimento do material, com o emprego de velocidade de avanço variável em processo. Neste caso observa-se uma ação conjunta da maior introdução de energia mecânica na amostra vf2, através do emprego da rotação de 6000 min⁻¹, com a aceleração da velocidade de avanço.

A repetibilidade das curvas de temperatura pode ser avaliada através do desvio-padrão. De um modo geral a dispersão dos resultados manteve-se entre 5 e 15% , salvo algumas exceções, como as curvas de gradiente de aquecimento das amostras com v_f variável, onde o desvio-padrão foi da ordem de até 20%, na amostra vf3.

Na medição de temperatura foram obtidos resultados significativos, que possibilitaram a sua correlação com a análise microestrutural, apesar de variações do próprio processo. Os diferentes picos e oscilações, tanto na fase de aquecimento como no resfriamento, devem ser resultado provavelmente de variações na fixação dos termopares.

8.4 Geometria e Qualidade das Buchas

Na análise geométrica das buchas produzidas verifica-se uma diferenciação das dimensões principais da bucha escoada em função das condições de trabalho.

As amostras com velocidade de avanço variável apresentaram em geral resultados mais favoráveis com relação à forma da bucha, com paredes mais espessas e mais curtas, que é uma característica desejável à capacidade de carga da bucha roscada [14].

O maior comprimento das amostras com 6000 min⁻¹ (10600 e vf2) ocorreu devido ao maior aquecimento e portanto maior plasticidade do material, que escoou mais facilmente com a ferramenta. A maior espessura de parede das amostras com v_f variável resultou do

aumento da velocidade de avanço [14], que não permitiu um maior escoamento do material na direção do avanço, o qual permaneceu na região superior da bucha.

Na qualidade das rebarbas foram obtidos valores de δ bastante baixos para todas as amostras, o que demonstra que as condições de trabalho utilizadas são adequadas para a obtenção de buchas com qualidade de rebarba otimizada, no material e na espessura utilizada para estes ensaios [3,14].

8.5

Análise Microestrutural

A caracterização microestrutural por microscopia óptica e eletrônica de varredura, em conjunto com a medição de temperatura, permite distinguir as amostras analisadas em dois grupos principais: (i) altas temperaturas máximas; (ii) baixas temperaturas máximas.

O primeiro grupo compreende as amostras 10300 e 10600, que foram aquecidas acima da temperatura A_{c1} , que é da ordem de 723 °C [37]. Este aquecimento elevado, em conjunto com a baixa intensidade de deformação nestas amostras, em comparação com as amostras do segundo grupo (vf1, vf2 e vf3), permitiu o surgimento de estruturas aciculares na região de maior deformação [30,37]. A recristalização observada nas amostras 10300 e 10600 ficou restrita a algumas regiões da bucha escoada.

A característica principal do segundo grupo, composto pelas amostras vf1, vf2 e vf3, foi a ocorrência de recristalização acompanhada por refino de grão em toda a região de maior deformação da bucha, em virtude dos níveis mais baixos de temperatura e da alta intensidade de deformação promovida pela aceleração da velocidade de avanço [28,30].

8.5.1

Caracterização microestrutural das amostras 10300 e 10600

A presença de grãos aciculares na região de maior deformação das amostras 10300 e 10600 é característica de transformação austenítica, quando o material é aquecido acima da temperatura A_{c1} , por tempo suficiente para que ocorra a formação de austenita.

A ocorrência de refino de grão na região superior do corpo de prova (Micrografias A das figuras 50 e 51, páginas 77 e 78) das amostras com v_f constante é provavelmente

conseqüência de alta intensidade de deformação localizada e numa temperatura localmente mais baixa. Nesta região o material, possivelmente, esteve em contato mais direto com a ferramenta, sendo deformado mais intensamente.

Esta deformação localmente mais elevada, em comparação com o restante da bucha e em conjunto com valores de temperatura não tão altos quanto os da amostra 10600, levou a um refino de grão mais acentuado na região A da amostra 10300 [28,30]. Da mesma maneira, o refino de grão observado na região C da amostra 10300 não foi tão intenso quanto o da região A, em virtude da intensidade de deformação mais baixa na região inferior da bucha.

A presença mais acentuada da estrutura acicular nas regiões C, D e E na amostra 10600, em comparação com a amostra 10300, foi observada por microscopia óptica e comprovada pela análise de imagens através de microscopia eletrônica de varredura. A distribuição do fator de forma em torno de valores baixos, na faixa de 0,3 a 0,4, comprova a grande concentração de grãos estreitos e alongados na amostra 10600.

O surgimento desta estrutura acicular foi possibilitada pela ação conjunta da temperatura, tempo e gradiente de temperatura. O aquecimento suficientemente alto possibilitou a formação de austenita, que em função do tempo de processo relativamente longo, favoreceu a transformação de uma boa parte da microestrutura, que com o rápido resfriamento levou à formação de estrutura acicular [30].

Através do diagrama da figura 85 pode-se obter a taxa de resfriamento mínima necessária para que a perlita não se forme. Este diagrama não foi obtido para as condições existentes no processo de furação por escoamento. Entretanto, devido à composição química semelhante, pode ser utilizado como indicativo para avaliar as microestruturas presentes nas amostras 10300 e 10600 em função da velocidade de resfriamento [40].

A linha tracejada em vermelho na figura abaixo refere-se a curva de resfriamento mínima necessária para que a perlita não se forme, com uma taxa de resfriamento de aproximadamente 120°C/s. A curva de resfriamento da amostra 10600, da ordem de 100°C/s e representada em azul na figura abaixo, foi suficiente para a formação de bainita. Esta curva cruzou os campos F e B, o que significa que a microestrutura observada na amostra 10300 deve ser constituída principalmente de ferrita e bainita, com alguma presença de perlita. Também foi observada a presença de ferrita de Widmanstätten [30] (micrografia E, figura 51, página 78).

Em estudos anteriores [10], a ocorrência de transformação bainítica e de reaustenitização também foram observadas nesta região deformada da bucha escoada, em função de elevadas temperaturas alcançadas durante o processo [10].

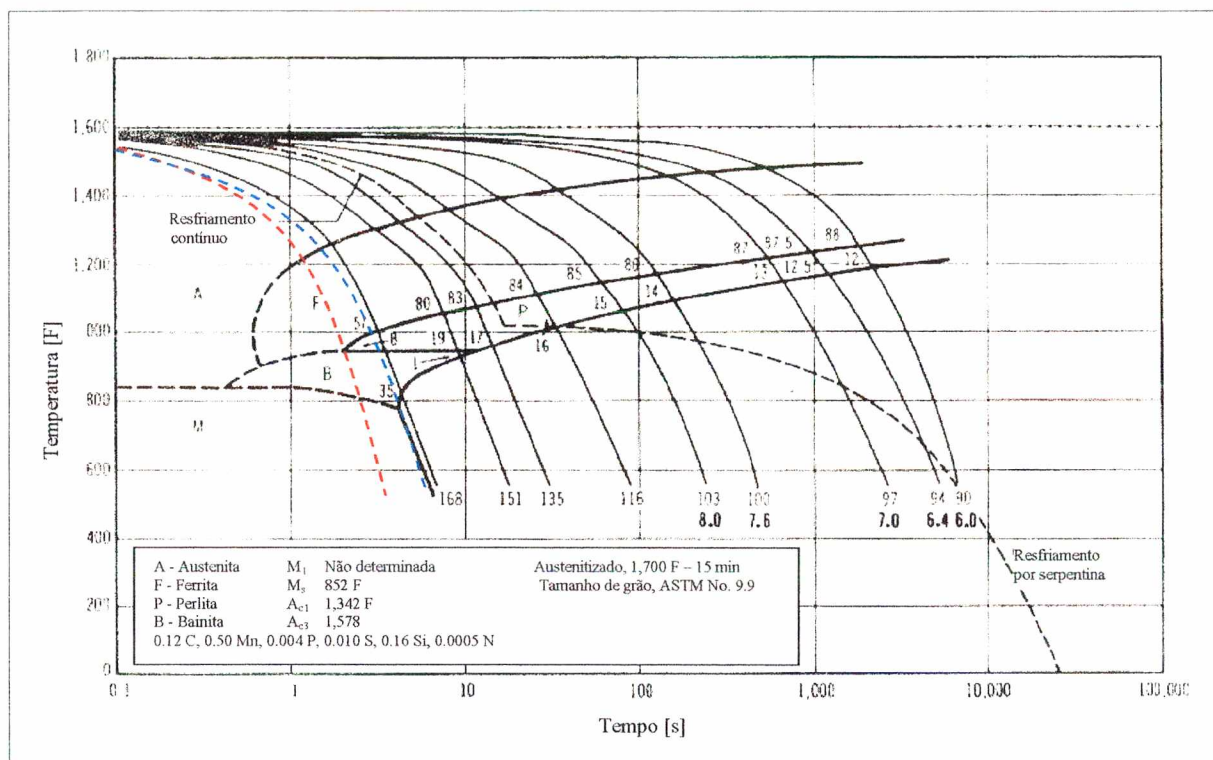


FIGURA 85 – Diagrama de resfriamento contínuo (CCD) para o aço AISI 1010 [40].

8.5.2

Caracterização microestrutural das amostras com v_f variável

A característica principal das amostras produzidas com v_f variável foi a ocorrência de recristalização e refino de grão em todas as amostras, marcadas pela presença única de microestrutura ferrítico-perlítica de grãos equiaxiais.

A associação da deformação em temperaturas entre 500 °C e 700 °C, na faixa da temperatura de recristalização de aços baixo carbono, com a alta intensidade de deformação provocada pela v_f variável, propiciou a ocorrência de recristalização e diminuição de tamanho de grão nestas amostras, ao contrário do observado em trabalhos anteriores [1].

Nos ensaios de Müller-Kraus [1], as alterações microestruturais, como abrangência da ZTA e presença de grãos altamente deformados, também podem ser correlacionadas às condições de trabalho. Neste caso, porém, o uso de baixa rotação e velocidade de avanço não possibilitou a ocorrência de recristalização.

Nas microestruturas observadas nas amostras com v_f variável deve ter ocorrido a mesma seqüência de transformações microestruturais descritas na seção 2.8.3 da página 34. Antes da recristalização o material sofreu recuperação, que em função da intensidade de deformação e temperatura, deve ter ocorrido dinamicamente [28]. A intensidade da recristalização observada nas amostras também sugere que esta tenha iniciado durante a deformação, portanto de forma dinâmica ou metadinâmica [27].

O mecanismo de refino de grão, em função da recristalização da microestrutura, observado nas regiões C, D e E das amostras com v_f variável, foi semelhante ao descrito na seção 2.8.4 da página 37. A figura 86 mostra um esquema de como a diminuição de tamanho de grão deve ter ocorrido nestas amostras.

Para as amostras v_{f1} e v_{f3} (curva azul) partiu-se de um microestrutura com tamanho de grão inicial $K_A \approx 15 \mu\text{m}$ no material base, que em função da deformação e temperatura por volta de $\approx 550 \text{ }^\circ\text{C}$ sofreu recuperação, recristalização e crescimento de grão, atingindo então o tamanho de grão final $K_E \approx 3 \mu\text{m}$. Como na amostra v_{f2} (curva vermelha) a deformação ocorreu a uma temperatura mais alta ($\approx 700 \text{ }^\circ\text{C}$), o tamanho de grão final K_E foi maior, situando-se na faixa de $6 \mu\text{m}$ [30].

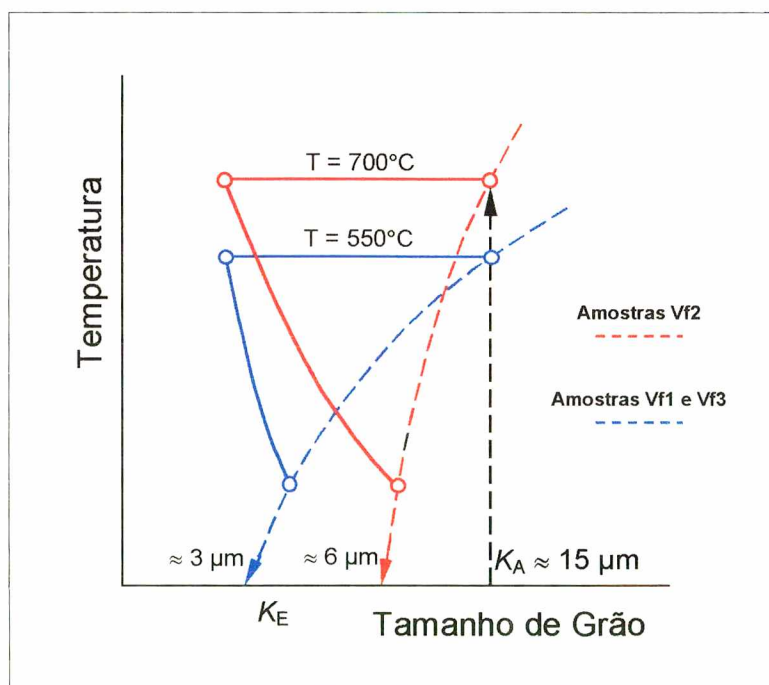


FIGURA 86 – Mecanismo de refino de grão para as amostras v_{f1} , v_{f2} e v_{f3} .

Pode se concluir que a força motriz para o crescimento de grão na amostra v_{f2} , em função da temperatura mais alta, era maior que a disponível nas amostras v_{f1} e v_{f3} .

O fenômeno de refino de grão na região superior da bucha (região A), encontrado nas amostras 10300 e 10600, foi observado de forma mais intensa nas amostras com v_f variável. Do mesmo modo, este refino de grão deve ter sido consequência de altas taxas de deformação nesta região, provocadas pelo aumento na velocidade de avanço. Em comparação com as amostras v_{f1} e v_{f3} , a amostra v_{f2} apresentou um refino de grão menos intenso na região A, devido provavelmente às maiores temperaturas alcançadas por esta amostra [28,30,37].

8.5.3

Técnica do material recozido

Da análise pela técnica do material recozido na seção 7.6.3 da página 92, verifica-se uma relativa semelhança entre as amostras com v_f variável, cujas microestruturas apresentaram a fase perlítica praticamente intacta na fase ferrítica. Nesta análise não foi encontrado nenhum rearranjo da perlita na matriz ferrítica nas amostras com v_f variável.

A solicitação termomecânica mais elevada das amostras 10300 e 10600 pôde ser observada de forma mais clara através desta técnica, onde o fenômeno do rearranjo da perlita na ferrita foi observado na amostra 10600 [30].

Os resultados da análise com material recozido permitem, devido ao maior tamanho de grão inicial, uma melhor visualização do trabalho termomecânico ao qual o material foi submetido. A deformação sofrida pelo material, em função das linhas de bandeamento, pode ser melhor observada.

Verifica-se que o uso desta técnica para análise microestrutural é limitado, em função dos problemas de deformação da chapa e inconsistência da forma da bucha nas amostras com v_f variável. A observação das transformações microestruturais fica prejudicada, em função da microestrutura inicial do material base ser diferente do material no estado normal, laminado a quente.

8.5.4

Microdureza HV 0,1

A análise de microdureza da região deformada das amostras revelou que o trabalho termomecânico, realizado na ZTA da bucha, foi diferenciado entre as amostras analisadas. Entretanto, pode-se notar em todas as amostras a existência do perfil de microdureza

observado por Müller-Kraus [1]. Este perfil refere-se à variação de microdureza da borda do furo em direção ao material base. Na amostra vf3 este perfil apresenta-se de forma típica em todas as seqüências de medições ao longo da borda interna da bucha.

As alterações microestruturais tiveram influência nítida nos valores de microdureza. A presença de estrutura acicular e de refino de grão elevou localmente a resistência mecânica do material, principalmente próximo à borda do furo, onde se localiza a região mais deformada durante o processo (figura 76, página 102).

Na amostra 10300, o refino de grão na região A (figura 50, página 77) elevou a microdureza em até 20% em relação ao material base [28]. Por outro lado, na região mais inferior desta amostra, a quase inexistência de refino de grão e a pouca presença de estrutura acicular mantiveram os valores de microdureza no nível do material base.

Já na amostra 10600 houve um aumento de microdureza na região inferior, mais deformada, decorrente da forte presença de estrutura acicular [30,37]. Nesta amostra o aumento de microdureza na borda não foi tão elevado, provavelmente devido à variações da microestrutura nesta região.

Analisando a seguir os perfis de microdureza das amostras vf1, vf2 e vf3, verifica-se a influência da recristalização na resistência mecânica do material da região deformada. Em função do intenso refino de grão ocorrido nesta região, de modo geral as amostras com v_f variável apresentaram valores 20% mais elevados na borda, em comparação com as amostras 10300 e 10600.

De modo semelhante à amostra 10300, as amostras vf1 e vf3 apresentaram valores bastante elevados na borda da bucha, próximo à superfície superior. Isto se deve ao forte refino de grão ocorrido nesta região, como demonstrado pela ampliação A das figuras 52 e 54, nas páginas 80 e 82.

O crescimento de grão mais acentuado da amostra vf2 refletiu-se na microdureza da região deformada, onde os valores foram mais baixos, em comparação com as amostras vf1 e vf3 [28]. O alcance da ZTA também pode ser avaliado pelo perfil de microdureza desta amostra. Neste caso não houve uma nítida redução do perfil de microdureza em direção ao material base, justamente pela maior zona de influência termomecânica presente nesta amostra.

Analisando os resultados da amostra vf3 percebe-se mais uma vez o gradiente de refino de grão na região deformada, observado por microscopia óptica, que reflete-se na diminuição dos valores de microdureza da borda em direção ao material base. Nesta

amostra os menores valores de microdureza foram da ordem de grandeza do material no estado original, laminado a quente.

Observando as curvas de microdureza de todas as amostras verifica-se uma dispersão de resultados em função de variações da microestrutura, decorrentes das alterações do processo. Nas amostras 10300 e 10600 esta variação nos resultados deve ter sido decorrente da presença simultânea de refino de grão e estrutura acicular. Já nas amostras com v_f variável a heterogeneidade do refino de grão foi responsável pela maior dispersão dos resultados.

8.6 Resistência à Tração

Os resultados dos ensaios de resistência à tração permitem a separação das amostras em dois grupos principais: (i) com velocidade de avanço constante; (ii) com velocidade de avanço variável.

Analisando o desvio-padrão das medições percebe-se que há uma certa repetibilidade nas medições e que a influência de variações microestruturais das amostras e variações do próprio processo de medição se manteve relativamente constante.

O primeiro grupo de amostras (10300 e 10600) atingiu valores de resistência máxima à tração praticamente equivalentes, mostrando que as pequenas variações na geometria das buchas e variações da microestrutura que levaram a diferentes perfis de microdureza, tiveram pouca influência nestas amostras.

Por outro lado, o segundo grupo (vf_1 , vf_2 e vf_3) apresentou em geral valores mais elevados do que as amostras 10300 e 10600. A maior capacidade de carga destas amostras deve ter sido resultado da combinação de uma geometria mais adequada (bucha mais curta e de paredes mais espessas) com uma microestrutura de grãos pequenos, com maior resistência mecânica, como demonstrado pelos perfis mais elevados de microdureza na borda da bucha [14]. Neste grupo as amostras vf_2 e vf_3 situaram-se num patamar abaixo da amostra vf_1 .

A capacidade de carga das amostras 10300 e 10600 foi de 5 a 10% menor que as amostras com v_f variável, o que foi suficiente para que as mesmas fossem classificadas com uma classe de resistência inferior. Embora a estrutura acicular fosse predominante na amostra 10600, que deve aumentar a resistência da bucha, esta por sua vez apresenta uma

geometria não adequada à capacidade de carga (bucha longa com paredes finas), o que pode ter sido a razão pela qual a amostra 10600 tenha alcançado uma classe de resistência inferior.

Para a exata compreensão do fenômeno de elevação da resistência mecânica nas amostras com v_f variável, as alterações na geometria da bucha devem ser levada em consideração. Embora tenham sido observadas somente pequenas alterações de geometria entre os diferentes grupos de amostras, estas podem ter provocado, em conjunto com intensas alterações microestruturais, a elevação na resistência à tração das amostras com v_f variável. A maior resistência mecânica obtida para a amostra $vf1$ deve ter sido em função de um conjunto de fatores favoráveis, dentro os quais se destacam a geometria da bucha - de comprimento menor e de parede mais robusta - e a microestrutura refinada, que resultou num perfil de microdureza mais adequado (valores da ordem de 240 HV na borda da bucha).

A determinação de classes de resistência mostra a tendência das amostras com v_f variável de apresentarem uma maior resistência mecânica. Embora as amostras 10300 e 10600 tenham atingido valores de resistência mecânica próximos aos das amostras $vf2$ e $vf3$, estes não foram suficientes para alcançar a sua classe de resistência. Neste aspecto a microestrutura mais refinada das amostras com v_f variável deve ter apresentado uma maior influência.

9 CONCLUSÕES

A aceleração da velocidade de avanço durante o processo de furação por escoamento influencia sensivelmente as características do processo. A aceleração da velocidade de avanço elevou em até 35% a força de avanço e em até 145% o momento torçor. Este aumento refletiu-se também na potência consumida, que atingiu valores de 3 kW nas amostras com v_f variável, contra apenas 1,5 kW nas amostras com v_f constante. Este valor, porém, não ofereceu risco de sobrecarga ao acionamento da máquina-ferramenta empregada.

O emprego de condições de trabalho constantes em processo aumenta o trabalho termomecânico. Este fato está associado ao tempo de processo relativamente longo, que promoveu uma maior introdução de energia mecânica nestas amostras.

Através desta maior introdução de energia, as amostras 10300 e 10600 alcançaram temperaturas mais elevadas. Nestas amostras a temperatura atingiu valores da ordem de 900 °C, bastante superiores à temperatura Ac1. Já nas amostras com v_f variável a aceleração da velocidade de avanço não possibilitou um aumento tão significativo de temperatura.

O aumento da rotação nas amostras com v_f variável ocasionou temperaturas de processo mais elevadas.

A geometria das buchas escoadas foi favorecida pelo uso de v_f variável. A obtenção de buchas mais apropriadas à capacidade de carga, mais curtas e de paredes mais espessas, foi característica deste grupo de amostras. A qualidade da rebarba não foi afetada pela uso de condições de trabalho variáveis em processo.

A análise metalográfica demonstrou que as transformações microestruturais dependem fortemente das condições de trabalho. Nas amostras com velocidade de avanço constante foram observados grãos de ferrita e estruturas aciculares, provavelmente ferrita de Widmanstätten. Esta microestrutura foi resultado de altas temperaturas (≈ 900 °C) conjugado com taxas de resfriamento elevadas.

A ocorrência de recristalização e de refino de grão marcaram as microestruturas das amostras com v_f variável. A aceleração da velocidade de avanço não possibilitou a elevação de temperatura acima da temperatura Ac1, que em conjunto com a maior intensidade de deformação levou à recristalização da estrutura e a um refino de grão bastante intenso.

Outro fenômeno que pôde ser observado foi o crescimento de grão em função da temperatura. Na amostra vf2 o uso de 6000 min^{-1} elevou a temperatura de trabalho favorecendo o crescimento de grão, após a recristalização.

A caracterização da ZTA pela medição de microdureza revelou uma camada mais endurecida em toda a extensão da borda interna da bucha. Entretanto, na região deformada da bucha, em função de alterações microestruturais, pôde-se observar heterogeneidades na microdureza.

Os ensaios de resistência à tração revelaram a tendência das amostras com v_f variável de apresentarem uma capacidade de carga mais elevada, em comparação a amostras produzidas com v_f constante. Esta tendência foi observada tanto nos ensaios de resistência a tração como nos experimentos de determinação das classes de resistência.

Pelos experimentos de resistência à tração realizados, não se pode distinguir com nitidez a relação entre a capacidade de carga e a microestrutura das amostras. Pela dispersão dos resultados e pela certa semelhança na geometria, as amostras vf2 e vf3 apresentaram resistência à tração equivalente às amostras 10300 e 10600, embora apresentassem uma microestrutura completamente diferente. Entretanto, um conjunto de fatores favoráveis, como geometria e microestrutura, deve ter levado a amostra vf1 a um patamar superior em capacidade de carga.

O uso de condições de trabalho variáveis em processo ocasiona uma microestrutura mais refinada, que provavelmente deve ter como conseqüência um melhor desempenho em trabalho da bucha roscada.

As técnicas de microscopia utilizadas permitiram a caracterização das alterações microestruturais observadas. A análise da presença de estrutura acicular, recristalização e refino de grão, através da análise de imagens e microscopia eletrônica de varredura, apresentou resultados significativos.

A técnica do material recozido se mostrou bastante válida como análise geral e preliminar, da intensidade de deformação e da influência termomecânica e do fluxo do material durante a furação por escoamento. Devido às características do material recozido, bastante discrepantes em relação ao material no estado normal, o uso desta técnica é bastante limitado.

A medição de microdureza revelou ser uma ferramenta importante para complementação da análise metalográfica, auxiliando na compreensão das transformações microestruturais e na avaliação da resistência mecânica do material.

Em função dos resultados obtidos neste trabalho, uma análise econômica do emprego de condições de trabalho variáveis em processo na furação por escoamento revela as suas principais vantagens:

- Diminuição drástica do tempo principal do processo;
- Melhoria na capacidade de carga das buchas roscadas;
- Potência de acionamento requerida em patamares usuais.

Entretanto, a utilização da tecnologia da furação por escoamento ainda está em processo de amadurecimento na indústria. Em função disso, e apesar de vários trabalhos nesta área já terem sido realizados, o domínio do emprego desta tecnologia em máquinas CNC ainda está longe de ser alcançado.

10 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

O emprego de condições de trabalho variáveis em processo na furação por escoamento ainda possui muitos aspectos a serem estudados. As limitações da aceleração da velocidade de avanço em processo, em termos de geometria e qualidade da bucha, bem como da vida da ferramenta, ainda devem ser investigadas. Uma análise mais detalhada da influência da dinâmica da máquina-ferramenta também necessita ser desenvolvida.

O método de medição de temperatura por termopares soldados no corpo de prova apresentou dificuldades, a julgar pela dispersão dos resultados, que devem ser solucionadas a fim de obter resultados mais significativos. O tamanho da solda-ponto, o posicionamento dos termopares e variações do próprio processo podem ter sido as principais fontes da variação nos dados obtidos.

O estudo das transformações microestruturais é um tema de pesquisa que ainda está longe de ser esgotado. O mapeamento completo da microestrutura da ZTA da bucha escoada é de grande relevância, para que o conjunto de alterações microestruturais nesta região possa ser avaliado.

Os fenômenos de recuperação e recristalização merecem ser pesquisados mais a fundo. Avaliar como ocorre a recristalização, se é de forma estática e/ou dinâmica, merece destaque.

Do mesmo modo a formação de estrutura acicular na região deformada apresenta-se como um aspecto importante, que deve ser pesquisado mais detalhadamente. A determinação do tipo de estrutura acicular formada nesta região coloca-se como ponto central neste tópico.

Outros aspectos não abordados neste trabalho, como o efeito da composição química e da microestrutura do material base nas alterações microestruturais, situam-se como tópicos de grande interesse de pesquisa.

As diferentes microestruturas caracterizadas neste trabalho devem afetar de alguma maneira algumas propriedades da bucha roscada, não somente as de resistência mecânica, como também de resistência à corrosão e à fadiga, as quais ainda devem ser objetos de estudo.

11

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] MÜLLER-KRAUS, F.U. Kenngrossenanalyse für das Fließlochformen und Gewindeformen in Stahlblech ST37-mittel auf CNC-Maschinen, Diplomarbeit Universität Kassel: INSTITÜT FÜR PRODUKTIONSTECHNIK UND LOGISTIK, Kassel, out. 1994, 105 p.
- [02] KRETSCHMER, G. Fließlochformen - Das Verfahren. In: Seminar - Fließlochformen und Gewinden: Berichte aus Wissenschaft und Praxis, 1, 12 out., 1995, Kassel, Alemanha, Anais ..., Kassel : IPL, 1995, não paginado.
- [03] LOPES, J. C. O. Furação por escoamento e rosqueamento por conformação. Florianópolis, SC, abr. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica - UFSC, 212 p.
- [04] VEREIN DEUTSCHER INGENIERE. Blechdurchzüge Fertigungsverfahren und Werkzeuggestaltung. VDI 3359, 1996.
- [05] WEINGAERTNER, W. L., TIKAL, F., LOPES, J. C. O., HEILER, R., et al. Flowdrilling: bushes formed in thin plates. In: International Manufacturing Engineering Conference, 7 a 9 aug., 1996, Connecticut, USA. Proceedings..., Connecticut : ASME, 1996, p. 227-231.
- [06] KOENIG, W. Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen, Bohren. Düsseldorf : VDI, 1981, Band I.
- [07] WEINGAERTNER, W. L., TIKAL F., LOPES, J. C. O., HEILER, R., et al. Thermoflowdrilling and Flowtapping – High resistance threads formed in thin metal sheets. In: International Conference on Production Research, XIV, 4-8 Aug., 1997, Osaka, Japan, Proceedings..., Osaka : Osaka Institute of Technology, Japan, 1997, p. 394-397.

- [08] BRITISH STEEL, Tubes & Pipes. Flowdrill jointing with Hollow sections. (Interior Report), Corby: BRITISH STEEL, Corby, England, Out. 1993, 14 p.
- [09] DUARTE Fº, O.C., WEINGAERTNER, W.L., LOPES, J.C.O., et al. Furação por escoamento: Relatório de pesquisa, convênio empresa Mercedes Benz do Brasil. Florianópolis : LMP, UFSC, dez. 1994, 25 p.
- [10] BRITISH STEEL, Tubes & Pipes. Flowdrill jointing system for hollow section connections- extension – draft final report. (Interior Report), Corby: BRITISH STEEL, Corby, England, Jul. 1994, 76 p.
- [11] WEINGAERTNER, W. L., TIKAL, F., LOPES, J. C. O., et al. Furação por fluência: aspectos da recuperabilidade do processo. Revista TecnoMetal, Portugal, n. 110, p. 5-9, Mai/Jun, 1997.
- [12] DUARTE Fº, O. C., 3º Relatório de estágio, Florianópolis/Kassel: LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PRECISÃO / INSTITUT FÜR PRODUKTIONSTECHNIK UND LOGISTIK, Florianópolis, 1996, 15 p.
- [13] LOPES, J. C. O., WEINGAERTNER, W. L., Fliesslochformen und Gewindefurchen - Erfahrungen auf konventionellen Werkzeugmaschinen. In: SEMINAR: FLIESSLOCHFORMEN UND GEWINDEN: BERICHTE AUS WISSENSCHAFT UND PRAXIS, 1., 12 out., 1995, Kassel, Alemanha. Anais ..., Kassel : IPL-GhK, 1995, não paginado.
- [14] HEILER, R. Fliesslochformen und Gewindefurchen auf CNC-Werkzeugmaschinen. In: Seminar - Fliesslochformen und Gewinden: Berichte aus Wissenschaft und Praxis, 1, 12 out., 1995, Kassel, Alemanha, Anais..., Kassel : IPL, 1995, não paginado.
- [15] ZECHA CENTERDRILL. Informationsbroschüre. Pforzheim, Germany, 1996.
- [16] FORMDRILL. International catalogue. Belgium, 1997.

- [17] DEKKERS, J.D. Flowdrilling – a new manufacturing process. Utrecht : Flowdrill B.V., Holanda, 1988, 32 p.
- [18] DRABUS. Now you can drill over 150.000 holes with a single drabus Sky flowdrill. Ruelzheim: Belgium, 1988.
- [19] ZECHA CENTERDRILL. Informationsbroschüre. Pforzheim, Germany, 1996.
- [20] KRETSCHMER, G. Fließlochformen von Blechdurchzügen. Siegen: Universität Siegen, 1980. 70 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universität Gesamthochschule - Siegen, 1980.
- [21] KALS, H. J. J., STREPPPEL, A. H. Flowdrilling: a Preliminary Analysis of a New Bush-Making Operation. Annals of the CIRP, v. 32, n. 1, 1983.
- [22] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. Mechanische Verbindungselemente, technische Lieferbedingungen, Festigkeitsklassen für Muttern, DIN 267 - Teil 4. Deutschland, Aug. 1983.
- [23] OLIVEIRA, C. A. S., Análise de textos sobre conformação a morno dos aços. Monografia. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, nov.1995, 14 p.
- [24] KOENIG, W., KLOCKE, F. Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen, Bohren. Aachen : Springer Verlag, 1997, Band I.
- [25] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen - Fachbegriffe und Ausdrücke, DIN 17014 - Teil 1. Deutschland, março. 1975.
- [26] OLIVEIRA, C. A. S., Desenvolvimento do aço DIN 17.102 WstE 355. In: Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 32, 06 a 08 nov., 1995, Curitiba, Anais..., Curitiba : ABM, 1995, p. 111-124.

- [27] REED-HILL, R. E. Princípios de Metalurgia Física. 2. Ed. Rio de Janeiro : Guanabara, 1982, 776 p.
- [28] PADILHA, A. F., SICILIANO Jr., F. Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura. 2. Ed. São Paulo : Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1996.
- [29] HAWKINS, D.N. Warm Working of Steels. In: Journal of Mechanical Working Technology. Amsterdam : Elsevier Science Publishers B.V., 11. 1985, p. 5-21.
- [30] SCHUMANN, H. Metalographie. 12. Auflage. Leipzig : Fachbuchverlag, 1978.
- [31] SOFT-IMAGING SOFTWARE GMBH. User's Guide Analysis 2.1. Alemanha, 1996, (manual de software).
- [32] SPIEGEL, M. R., Manual de fórmulas e tabelas matemáticas. São Paulo : McGraw-Hill, 1973.
- [33] KALPAKJIAN, S. Manufacturing Engineering and Tecnology. 3. Ed. Massachusetts : Addison-Wesley Publishing Company, 1995.
- [34] DUARTE Fº, O. C. Relatório de Trabalho de Pesquisa, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Mecânica de Precisão – LMP, Florianópolis, 1997.
- [35] LEITHOLD, L. O Cálculo. Vol. 1. São Paulo : Harbra, 1977.
- [36] SCHRAMM, C. R., DUARTE Fº, O. C. Manual de Aquisição de Força de Avanço e Momento Torçor. Relatório Interno, Florianópolis : UFSC, LMP, 1997.
- [37] LIEDTKE, D., JÖNSSON, R. Wärmebehandlung: Grundlagen und Anwendungen für Eisenwerkstoffe. Ehningen bei Böblingen : Expertverlag, 1991

- [38] INDÚSTRIAS ROMI S/A. Romi Polaris F400 - Manual de Providências Iniciais. São Paulo, 1995, (Manual).
- [39] MALISKA, C. R. Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos. Rio de Janeiro : LTC, 1995.
- [40] AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams Metals Park. EUA.
- [41] SPESCHA, G., VOLLE, E. Piezoelektrische Messgeräte. Winterthur : Kistler Instruments AG, 27 p.
- [42] HEWLETT PACKARD. Multimeter HP 34401A - User's Guide. EUA, 1995.
- [43] COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA. Relatório de Composição Química – SAE 1012. Santos, 1997.
- [44] WEGST, C. W. Stahlschlüssel. Marbach : Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH, 1983.

12 ANEXOS

12.1 Máquina-ferramenta

Os principais dados da máquina-ferramenta Romi CNC, ilustrada na figura 87, são listados abaixo:

Potência de acionamento:	15 kW		
Rotação máxima:	6000 min ⁻¹		
Avanço máximo:	30000 mm/min		
Cursos dos eixos:	X 710 mm	Y 420 mm	Z 600 mm
Erro de posicionamento máximo	X 20 μm	Y 30 μm	Z 10 μm

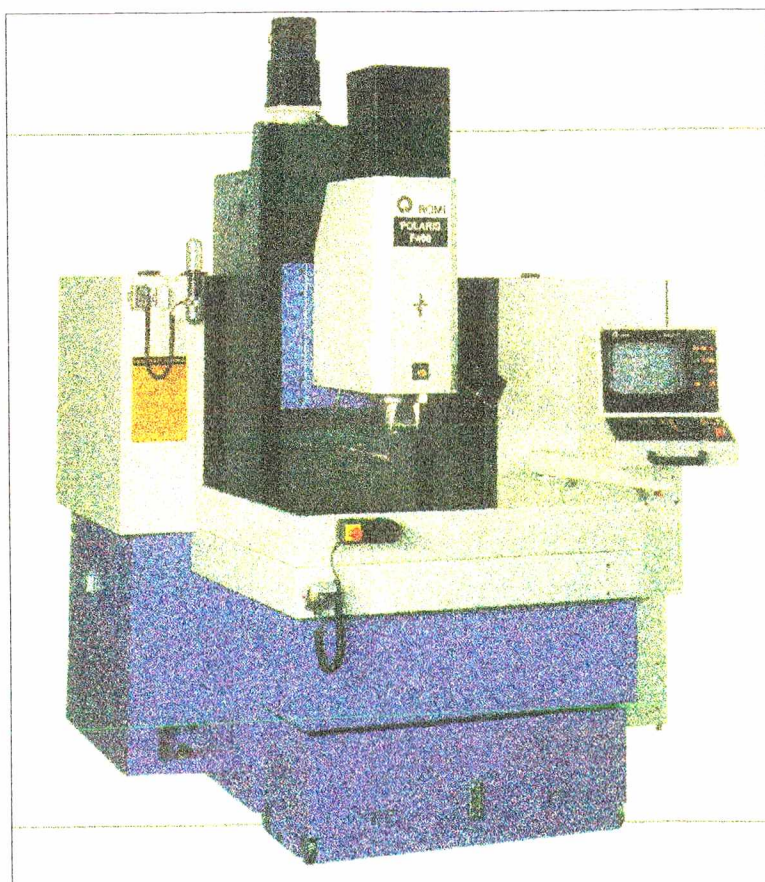


FIGURA 87 - Máquina-ferramenta Romi F400 [38].

12.2

Plataforma Piezelétrica

Esta plataforma, na figura 88, é responsável pela emissão de sinais elétricos, gerados por células de carga compostas por cristais piezelétricos, proporcionais aos esforços de força de avanço e momento torçor durante o processo.

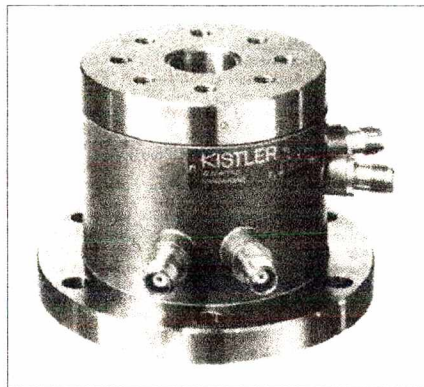


FIGURA 88 - Plataforma piezelétrica KISTLER 9273 [41].

As principais características da plataforma são listadas abaixo:

Fabricante	Kistler Instrumentos A.G.	
Modelo	9273	
Faixa de Indicação	(Ff) -5... 20 kN	(Mt) -100... 100 Nm
Linearidade	$\leq \pm 1\%$ VFE	
Incerteza de medição	$\leq \pm 1\%$	
Temperatura de utilização	0... 70°C	

12.3

Sistema de Aquisição e Tratamento de Dados

Os esforços mecânicos proporcionados pela atuação da ferramenta na peça são convertidos em sinais elétricos pelas células de carga da plataforma piezelétrica. Estes sinais passam por amplificadores, modelo KISTLER 5011, para em seguida serem adquiridos pelo analisador de sinais, modelo HP 3563 A, onde são tratados e plotados em relação ao tempo.

Após a execução de cada ensaio os dados de força de avanço e momento torçor correspondentes são gravados em um computador IBM/PC compatível, através de um programa de aquisição elaborado especialmente para tal tarefa. Os dados são gravados no computador com a extensão .DAT, formato que é lido pelo programa *for DOS* SADA, desenvolvido no LMP, para análise de dados. Este programa permite a visualização e obtenção de pontos característicos das curvas de força de avanço e momento torçor [3], como ilustrado na figura 89.

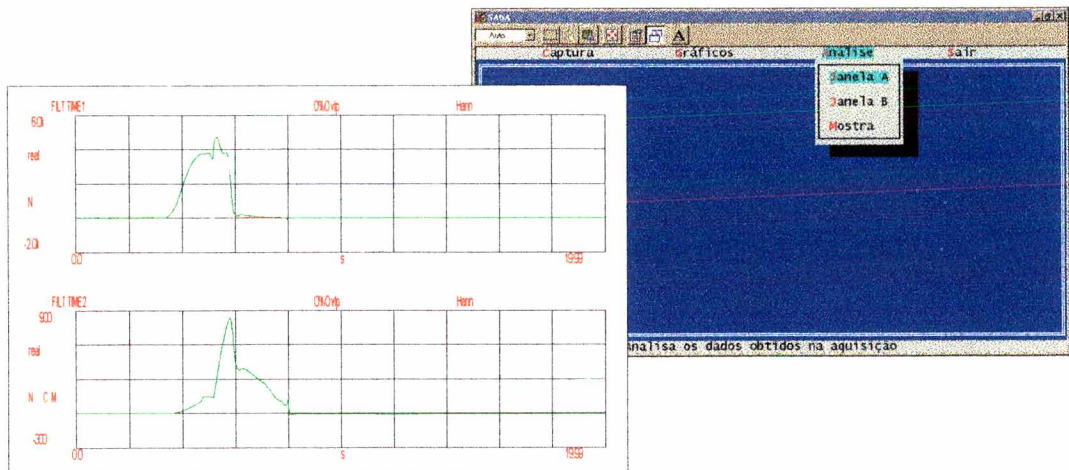


FIGURA 89 - Apresentação dos gráficos de força de avanço e momento torçor no programa SADA.

Para o tratamento em outros softwares de planilhas de dados, como o Microsoft Excel®, os arquivos .DAT sofrem a conversão para o formato .TXT, através do software *CONVERT* de conversão de dados.

12.4 Material Aço SAE 1012

A composição química do material dos corpos de prova, fornecida pela empresa COSIPA, é apresentada na tabela 10.

Segundo a norma SAE [44], estes valores estão de acordo com o estabelecido para o aço SAE 1012.

As propriedades mecânicas são listadas na tabela Tab. 11. Estes valores foram retirados da norma alemã DIN, para um aço de baixo carbono com composição química equivalente [44].

TABELA 10 - Composição química do aço SAE 1012 [43].

C	Mn	P	S	Cu	Cr	Nb
0,11	0,38	0,013	0,008	0,02	0,02	0,002

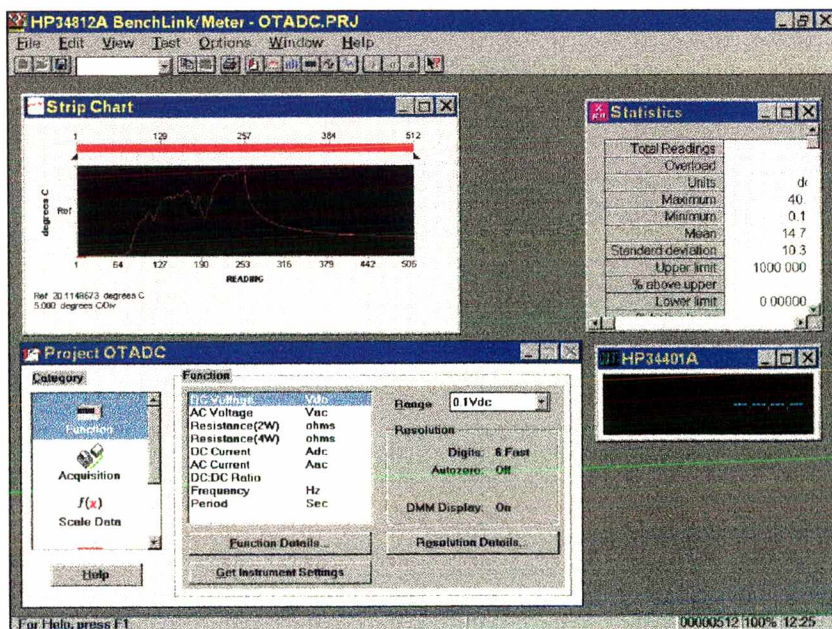
TABELA 11 - Principais propriedades mecânicas para o aço SAE 1012 [44.].

Dureza HB 30	Limite de Escoamento [N/mm ²]	Resistência à Tração [N/mm ²]	Along. [%]
90-126	390	640-780	13

12.5

Sistema de Aquisição de Dados de Temperatura

A diferença de potencial gerada pelos termopares em função do gradiente de temperatura é medida pelo micro-voltímetro HP 34812A. Estes dados são então transferidos automaticamente para um computador IBM-PC compatível, através do programa *BenchLink/Meter* de aquisição e tratamento de dados fornecido pelo fabricante do micro-voltímetro, cuja janela de trabalho é ilustrada na figura 90.

FIGURA 90 - Área de trabalho do programa *BenchLink/Meter* [42].

O micro-voltímetro dispõe de memória interna máxima de 512 medições, o que de certa maneira limita a frequência das medições de temperatura. O tempo total de medição depende da frequência de medição, que neste aparelho é determinada em função da resolução do mostrador. Como apenas 5 níveis distintos de resolução podem ser selecionados, a frequência e portanto o tempo de medição são limitados a 5 variações possíveis.

Deste modo foi escolhida então a frequência que proporciona o tempo de medição de ≈ 85 s, o qual é suficiente para cobrir os períodos de aquecimento e resfriamento do processo.

12.6 Dispositivo de Fixação – Ensaios de Medição de Temperatura

Na Figura 91 é ilustrado o desenho técnico deste dispositivo.

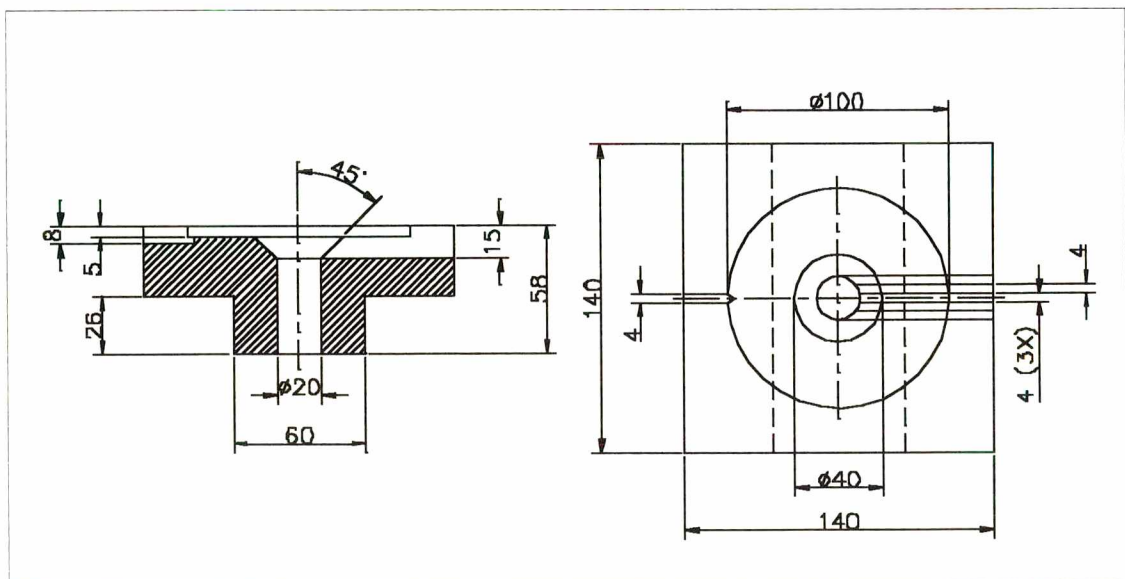


FIGURA 91 - Dimensões do dispositivo de fixação para os ensaios de temperatura [36].

12.7 Microscópio Universal Leitz-Strasman

Para a medição da geometria da bucha e da qualidade da rebarba foi utilizado o microscópio universal Leitz-Strasman, ilustrado na figura 92, através da técnica de medição óptica diferencial [12].

As principais características técnicas deste equipamento são listadas a seguir:

Faixa de medição:	1000 x 200 mm.
Valor mínimo de escala:	1 μm .
Ampliações:	10 x até 150 x.

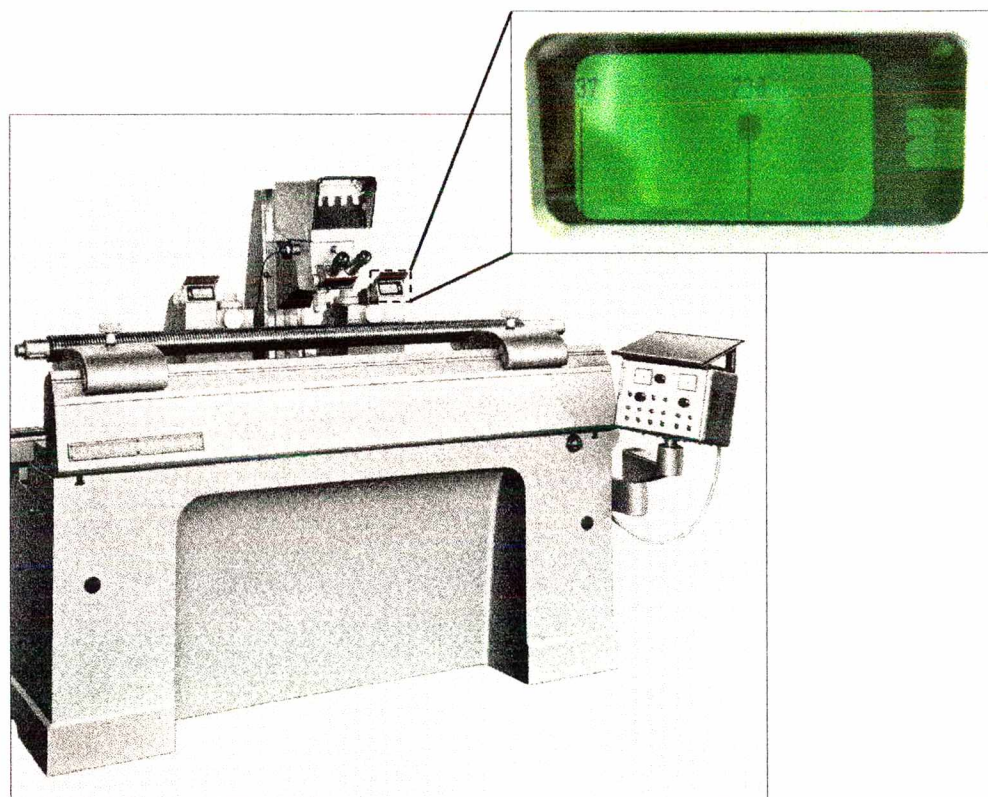


FIGURA 92 - Microscópio universal de medição com detalhe do visor, com divisão de escala de 1 μm [12].

12.8 Programa Analisador de Imagens *analySIS*

Neste programa é possível a qualificação de diferentes fases de microestruturas, bem como o cálculo de grandezas geométricas referentes aos grãos pertencentes a estas fases. Para a análise desenvolvida neste trabalho foram abordadas as variáveis geométricas fator de forma s , diâmetro médio d e área dos grãos a de regiões da microestrutura das buchas escoadas. Na figura 93 é apresentada a área de trabalho deste programa.

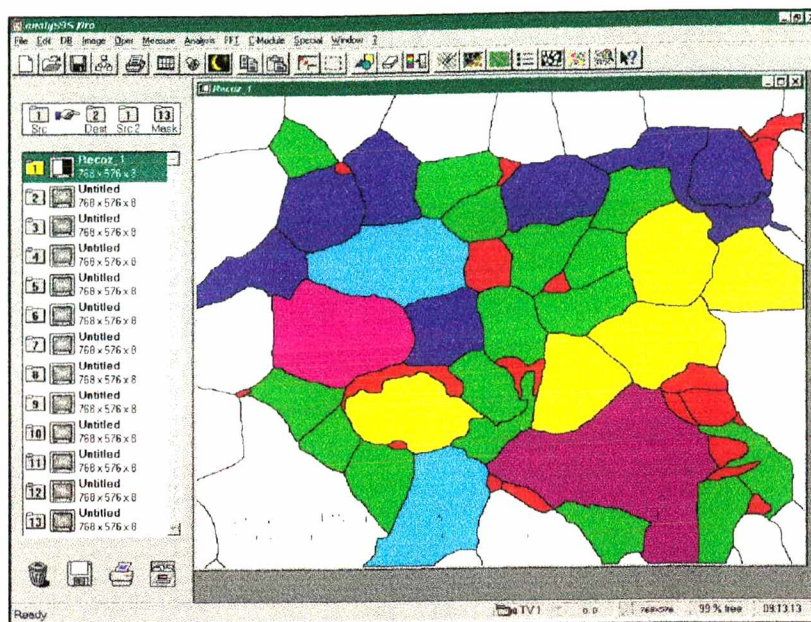


FIGURA 93 - Janela do programa *analySIS* de análise de imagens [31].

12.9

Cálculo de Integração no Programa Microsoft Excel®

Para a integração dos dados de F_f e M_t para a obtenção dos valores de trabalho de rotação (W_R) e trabalho de translação (W_T), foi utilizada a técnica de integração pela somatória de Riemann de integrais definidas [35]. A integral da área abaixo da curva é dada então pela equação 15, onde o eixo X é o tempo e o eixo Y a força de avanço ou o momento torçor.

$$\int y dx = \sum_{i,j=1}^n \frac{Y_{j+1} + Y_j}{2} \cdot (X_{i+1} - X_i) \quad (15)$$

12.10

Tratamento Estatístico

As equações para o cálculo do valor médio (equação 16) e do desvio-padrão (equação 17) utilizadas na análise estatística dos dados são apresentadas abaixo [32]:

Valor médio:
$$\bar{x}_n = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (16)$$

Desvio-padrão:
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (17)$$

12.11 Máquina de Tração Universal Zwick 1484

Nesta máquina, ilustrada na figura 94, foram realizados os ensaios para determinação da carga de resistência máxima e da classe de resistência das amostras.

As características técnicas deste equipamento, que dispõe de um mecanismo regulador de velocidade, são listadas abaixo:

Carga de tração máxima: 200 kN

Velocidade Transversal: 5 mm/min

Acionamento regulável por corrente contínua.

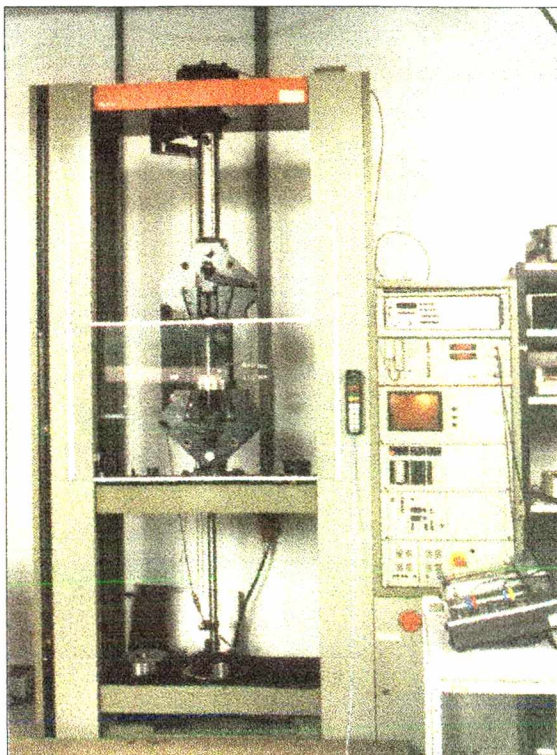


FIGURA 94 – Máquina de tração universal Zwick 1484 [1].

Os dados de carga aplicada e deslocamento no eixo de tração são transferidos para um computador através de uma placa de aquisição, os quais são gravados em um arquivo de planilha de dados, compatível com o programa Microsoft Excel®.

12.12

Ensaio de Classes de Resistência - Procedimentos da Norma DIN 267/4

Os procedimentos da norma DIN 267/4 [22] para os ensaios de classe de resistência são descritos a seguir:

- A carga é aplicada axialmente na rosca da bucha tracionando-se o parafuso, e então é mantida constante durante 15 segundos. A bucha roscada ou porca deve suportar esta carga sem que seja deformada ou rompida.

- Após o carregamento, o parafuso deve ser desenroscado da bucha manualmente. A introdução deste movimento de retirada do parafuso pode ser auxiliada por uma ferramenta, sendo permitido neste caso apenas $\frac{1}{2}$ giro do parafuso, antes da retirada por completo, executada manualmente.

Caso a bucha roscada não suporte a carga de uma determinada classe de resistência, esta deve ser testada com a carga da classe de resistência imediatamente inferior.