

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

***RELAÇÃO ENTRE PROCESSO, MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES
MECÂNICAS NA FURAÇÃO POR ESCOAMENTO DE AÇOS DE BAIXO
CARBONO***

**TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**

MOACIR ECKHARDT

FLORIANÓPOLIS, OUTUBRO DE 2003.

**RELAÇÃO ENTRE PROCESSO, MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES
MECÂNICAS NA FURAÇÃO POR ESCOAMENTO DE AÇOS DE BAIXO
CARBONO**

MOACIR ECKHARDT

**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
DOUTOR EM ENGENHARIA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, APROVADA EM SUA FORMA
FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Prof. Dr.Ing. Walter L. Weingaertner
Orientador

Prof. D.Sc. Carlos A. S. de Oliveira
Co-orientador

Prof. Dr. José A. Bellini da Cunha Neto
Coordenador do PPGEM

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr.Ing. Walter L. Weingaertner
Presidente

Prof. Dr.Ing. Lírio Schaeffer
Relator

Prof. Dr.Ing. Augusto J. A. Buschinelli

Prof. Dr.Eng. Rolf B. Schroeter

Prof. Dr.Eng. Cleiton R. Teixeira

Aos meus pais
Olinda e Arlindo (*in memoriam*).
À minha esposa **Marinês**
e aos meus filhos **Adriana e Otávio**.
A todos os familiares.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr.Ing. Walter Lindolfo Weingaertner, pela orientação deste trabalho, e pela confiança, incentivo e apoio.

Ao Prof. D.Sc. Carlos Augusto Silva de Oliveira, co-orientador deste trabalho, pela orientação, motivação, atenção e presteza.

À CAPES – PICD pela concessão de bolsa de estudo.

À empresa ZECHA, pela doação de ferramentas que contribuíram para a realização deste trabalho.

À Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA e à Companhia Siderúrgica Nacional - CSN pela doação de material.

A UNIJUÍ pela oportunidade de qualificação concedida aos seus docentes.

Ao amigo Dr.Eng. Cleiton Rodrigues Teixeira, pelos diversos auxílios e inúmeras discussões a respeito do trabalho.

Ao Prof. Dr.Eng. Rolf Bertrand Schroeter, pela amizade e companheirismo demonstrados.

Ao Eng. Mecânico Ercio Massirer Júnior, amigo e então bolsista de iniciação científica, pelos numerosos e valiosos auxílios na realização deste trabalho.

Aos amigos e funcionários do LMP, pela ajuda na realização das pesquisas.

Ao Departamento de Tecnologia – DeTec e aos colegas do curso de Engenharia Mecânica da UNIJUÍ pelo incentivo, apoio e colaboração.

Aos colegas Prof^ª. Rosane Kirchner pela orientação na realização do tratamento estatístico dos dados e, Prof. Wang Chong pelo auxílio na realização da simulação numérica.

Aos Eng. Mecânicos Adonis Pellin e Gilberto Sackser pelo auxílio na realização de ensaios mecânicos, preparação de corpos de prova e obtenção de imagens metalográficas.

Ao Técnico em Mecânica de Precisão Cleber Homem pela realização de desenhos em CAD.

A todos aqueles que de uma ou outra maneira contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Moacir Eckhardt, nascido em 24 de maio de 1966 na cidade de Humaitá, no Rio Grande do Sul, filho de Arlindo Eckhardt e Olinda Führt Eckhardt. Concluiu o curso primário em 1974 na Escola Estadual Visconde de Cairú, e o curso ginásial em 1980 no Colégio Concórdia em Santa Rosa. De 1981 a 1983 cursou o 2º grau formando-se como Auxiliar Técnico em Eletricidade no Colégio Concórdia de Santa Rosa. Em março de 1984 ingressou no curso de graduação em Engenharia Industrial Mecânica da Fundação Missioneira de Ensino Superior – FUNDAMES em Santo Ângelo, vindo a concluir o curso em dezembro de 1988.

Em março de 1989 ingressou no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, obtendo o título de Mestre em março de 1993 com a dissertação intitulada “*Utilização de alargadores de gume único regulável para a obtenção de furos de precisão*”. O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Mecânica de Precisão – LMP/UFSC, em Florianópolis, SC, sob orientação do Prof. Dr. Ing. Walter Lindolfo Weingaertner. Em setembro de 1996 iniciou o curso de Doutorado em Engenharia Mecânica da UFSC, na área de Fabricação. Nesse período atuou como pesquisador e coordenador do Grupo de Furação por Escoamento e Rosqueamento por Conformação – FURCON do Laboratório de Mecânica de Precisão - LMP, participando de trabalhos e publicações nessa área.

A atuação profissional teve início em agosto de 1991 como docente do curso de Engenharia Industrial Mecânica da FUNDAMES de Santo Ângelo, RS, atuando na área de Metrologia e Automação, onde permaneceu até fevereiro de 1992. Em março de 1992, ingressou como docente do Centro Técnico Mecânico do Colégio Evangélico Panambi, em Panambi, atuando na área de Processos de Fabricação Mecânica, Ensaios e Controle Dimensional onde permaneceu por períodos intercalados até maio de 1996.

A atuação no Departamento de Tecnologia – DeTec da Universidade Regional do Noroeste do Estado do RS - UNIJUÍ iniciou em março de 1992 permanecendo até a presente data. No DeTec vem desempenhando atividades ligadas ao ensino, pesquisa, extensão e administração, onde podem ser destacadas atuações como professor dos Cursos de Graduação em Engenharia Mecânica

ministrando componentes curriculares ligados a área de Fabricação e dos Cursos de Pós-Graduação Lato Sensu em Gestão da Produção e em Engenharia de Segurança do Trabalho e como Coordenador do Laboratório de Fabricação Assistida. Neste período desempenhou, também, atividades como Coordenador do Colegiado de Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica, Chefe Substituto do DeTec e Coordenador da Extensão do DeTec.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	18
SIMBOLOGIA	21
RESUMO	26
ABSTRACT	27
1 INTRODUÇÃO	28
2 ESTADO DA ARTE	31
2.1 Furação por Escoamento	31
2.1.1 O processo de furação por escoamento	31
2.1.2 Aplicações do processo	32
2.1.3 Tecnologia do processo de furação por escoamento	34
2.1.4 Grandezas de entrada	35
2.1.5 Características do processo	38
2.1.6 Resultados de trabalho	44
2.2 Rosqueamento por Conformação	50
2.2.1 Cinemática do processo de rosqueamento por conformação	50
2.2.2 Tecnologia do processo de rosqueamento por conformação	52
2.2.3 A ferramenta para rosqueamento por conformação	53
2.2.4 Formação do filete de rosca	54
2.2.5 Resultados de trabalho	55
2.3 Encruamento, Recuperação e Recristalização	55
2.3.1 Encruamento	56
2.3.2 Recuperação e recristalização	57
2.3.3 Processos de restauração durante a deformação	65
2.4 Mecanismos de Endurecimento nos Aços	69

2.4.1 Endurecimento por solução sólida	69
2.4.2 Endurecimento por dispersão de precipitados	70
2.4.3 Efeito da densidade de discordâncias	71
2.4.4 Efeito do tamanho de grão	71
2.4.5 Transformações de fases	72
2.5 Efeito das Fases Presentes	73
2.5.1 Ferrita	73
2.5.2 Perlita	75
2.5.3 Martensita	78
2.5.4 Bainita	81
2.5.5 Microestruturas mistas	85
3 OBJETIVOS DO TRABALHO	86
4 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	87
4.1 Metodologia	87
4.2 Condições de Trabalho	89
4.3 Ferramentas e Lubrificantes	90
4.4 Materiais Empregados	91
4.5 Corpos de Prova	93
4.6 Dispositivo de Fixação dos Corpos de Prova	94
4.7 Máquina-Ferramenta	94
4.8 Sistemas de Aquisição de Sinais	94
4.8.1 Força de avanço e momento torçor	95
4.8.2 Temperatura	96
4.9 Trabalho de Conformação e Potência	98
4.10 Geometria e Qualidade da Bucha Escoda	99
4.11 Análise Metalográfica	99
4.11.1 Microscopia óptica	100
4.11.2 Microscopia eletrônica de varredura – MEV	101
4.12 Caracterização das Propriedades Mecânicas	101
4.12.1 Microdureza	101
4.12.2 Ensaio mecânico de tração	103
4.13 Análise Estatística	104

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	106
5.1 Esforços Gerados nos Ensaios	106
5.1.1 Influência dos parâmetros de trabalho	107
5.1.2 Influência da espessura do material	109
5.1.3 Influência do teor de carbono do material	110
5.2 Tempo de Processo e Trabalho de Conformação	112
5.2.1 Tempo de processo	112
5.2.2 Trabalho de conformação	114
5.3 Temperaturas Desenvolvidas	116
5.3.1 Influência dos parâmetros de trabalho	117
5.3.2 Influência da espessura do material	119
5.3.3 Influência do teor de carbono do material	120
5.4 Geometria e Qualidade da Bucha Escoda	121
5.4.1 Influência dos parâmetros de trabalho	122
5.4.2 Influência da espessura do material	123
5.4.3 Influência do teor de carbono do material	123
5.5 Análise Micrográfica dos Furos Escoados	124
5.5.1 Influência dos parâmetros de trabalho	128
5.5.2 Influência da espessura do material	134
5.5.3 Influência do teor de carbono do material	137
5.6 Microdureza dos Furos Escoados	142
5.6.1 Influência dos parâmetros de trabalho	142
5.6.2 Influência da espessura do material	145
5.6.3 Influência do teor de carbono do material	146
5.7 Análise das Buchas Roscadas	147
5.8 Resistência das Buchas Roscadas	151
5.8.1 Carga máxima de resistência à tração	151
5.8.2 Classe de resistência	153
5.9 Avaliação Teórica da Resistência da Rosca	155
5.9.1 Cálculo da resistência	155
5.9.2 Simulação numérica	156
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS	164
6.1 Relação entre o Processo e suas Características	164

6.1.1 Esforços e potência na furação	164
6.1.2 Tempo de processo	167
6.1.3 Trabalho de conformação	167
6.1.4 Temperatura	168
6.1.5 Geometria e qualidade das buchas	172
6.2 Relação entre as Características do Processo e a Microestrutura	173
6.3 Relação entre a Microestrutura e as Propriedades Mecânicas	176
6.3.1 Microdureza	176
6.3.2 Resistência à tração	178
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE CONTINUIDADE	181
7.1 Conclusões	181
7.1.1 Relação entre o processo e suas características	181
7.1.2 Relação entre as características do processo e a microestrutura	183
7.1.3 Relação entre a microestrutura e as propriedades mecânicas	184
7.2 Sugestões de Continuidade	185
8 REFERÊNCIAS	188
ANEXOS	202
A - Dispositivo de Fixação dos Corpos de Prova	202
B - Máquina-Ferramenta	202
C - Sistema de Aquisição de Sinais de Esforços	203
C1 - Dinamômetro piezométrico	203
C2 - Amplificadores de sinais	203
D - Sistema de Aquisição de Sinais de Temperatura	204
D1 – Multímetro digital	204
D2 - Programa de aquisição	204
E - Sistema de Aquisição e Tratamento de Imagens	204
E1 - Microscópio óptico com platina invertida	204
E2 - Image-Pro Plus	204
E3 - Micrômetro ocular digital	205
F - Máquina Universal de Ensaio	205
G - Cálculo da Resistência da Rosca	206

G1 - Tensão de cisalhamento na raiz dos filetes	206
G2 - Tensão de cisalhamento na seção da chapa	206
H - Análise Estatística do Diâmetro e Fator de Forma dos Grãos	207
H1 - Análise de variância (ANOVA)	207
H2 - Comparação de médias duas a duas	213

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ferramenta de furação por escoamento de metal-duro	28
Figura 2 – Resultados da aplicação dos processos de furação por escoamento e rosqueamento por conformação	28
Figura 3 – Seqüência da conformação de uma bucha pelo processo de furação por escoamento	31
Figura 4 – Colunas de direção de veículos automotores	32
Figura 5 – Conexão de tubos de cobre	32
Figura 6 – Sistema de eixo frontal de veículos automotores	33
Figura 7 – Buchas roscadas para fixar niveladores	33
Figura 8 – Buchas roscadas em vasos de pressão	33
Figura 9 – Quadro de bicicletas e cadeiras de rodas	34
Figura 10 – Estruturas metálicas	34
Figura 11 – Principais grandezas de entrada, características e resultados do processo de furação por escoamento	35
Figura 12 – Geometria da ferramenta de furação por escoamento	36
Figura 13 – Tipos de ferramentas de furação por escoamento e formatos de buchas obtidos	37
Figura 14 – Fases da furação por escoamento	40
Figura 15 – Predominância da(s) fonte(s) geradora(s) de calor de acordo com as partes da ferramenta	43
Figura 16 – Dimensões principais da bucha escoada	45
Figura 17 – Grupos de qualidade das rebarbas inferiores	46
Figura 18 – Micrografia da região superior da bucha escoada apresentando estrutura com recristalização e refino de grão	47
Figura 19 – Micrografia da região inferior (rebarba inferior) da bucha escoada apresentando estrutura de grãos aciculares	47
Figura 20 – Micrografia da região superior da bucha escoada apresentando estrutura com intensa recristalização e refinamento	48
Figura 21 – Micrografia da região inferior (rebarba inferior) da bucha escoada apresentando estrutura de grãos equiaxiais refinados	48
Figura 22 – Medições de microdureza na região da borda da bucha	49

Figura 23 – Formação dos filetes no rosqueamento por conformação	52
Figura 24 – Resumo esquemático do processo de rosqueamento por conformação	52
Figura 25 – Macho de conformação com 5 cantos	53
Figura 26 – Macho de conformação de aço-rápido revestido com TiN	53
Figura 27 – Macrografia de filetes de rosca formados por rosqueamento por conformação e por usinagem	54
Figura 28 – Aparência da “garra” na crista do filete formado por rosqueamento por conformação	54
Figura 29 – Classes de resistência atingidas por buchas escoadas confeccionadas em chapas finas de aço ST37 (ABNT 1020)	55
Figura 30 – Variação esquemática das propriedades mecânicas com o aumento da deformação plástica	57
Figura 31 – Curva de recozimento isotérmico	58
Figura 32 – Modificações microestruturais e das propriedades mecânicas na recuperação, recristalização e crescimento de grão	58
Figura 33 – Esquema do processo de poligonização	59
Figura 34 – Efeito da deformação na cinética de recristalização do alumínio a 350°C	60
Figura 35 – Curvas de transformação isotérmica (recristalização) para cobre puro laminado a frio, 98%	60
Figura 36 – Representação esquemática da nucleação por migração de contornos induzida por deformação	62
Figura 37 – Coalescimento de dois subgrãos por “rotação” de um deles	63
Figura 38 – Representação esquemática da recristalização primária. (a) Início da recristalização. (b) 50% de recristalização. (c) Recristalização completa	64
Figura 39 – Estrutura de grãos mostrando a influência do número de lados dos contornos. Os grãos com 6 lados estão em equilíbrio	65
Figura 40 – Curvas esquemáticas tensão-deformação mostrando comparativamente a ocorrência de encruamento, recuperação dinâmica e recristalização dinâmica	67
Figura 41 – Recristalização dinâmica durante a deformação a quente. (a) Alta taxa de deformação. (b) Baixa taxa de deformação	67

Figura 42 – Mecanismo de nucleação por formação de colares sucessivos. (a) Grão original. (b) Primeira etapa ocorrendo junto aos contornos de grão. (c) Segunda etapa ocorrendo junto aos grãos recristalizados dinamicamente. (d) Terceira etapa, idem a segunda. (e) Quarta etapa, estado estacionário	68
Figura 43 – Efeitos de endurecimento por solução sólida em aço de baixo carbono	69
Figura 44 – Variação do limite de escoamento de um aço baixo carbono com o tamanho de grão ferrítico para diversas temperaturas de ensaio	72
Figura 45 – Efeito da temperatura de transformação sobre o aumento da resistência de estruturas ferrítica-perlítica e bainítica	73
Figura 46 – Crescimento de ferrita pró-eutetóide	74
Figura 47 – Características básicas da perlita	76
Figura 48 – Temperatura de transição versus tamanho de grão austenítico inicial	77
Figura 49 – Efeito da temperatura de transformação sobre o diâmetro do nódulo para tamanhos de grãos austeníticos iniciais diferentes	78
Figura 50 – Características microestruturais da martensita em ripas	79
Figura 51 – Limite de escoamento versus diâmetro do pacote D, para aço com 0,2% C (Marder e Krauss, Swarr) e aço ao Mn (Roberts)	80
Figura 52 – Estruturas bainíticas	82
Figura 53 – Efeito do tamanho de grão da ferrita bainítica sobre o limite de escoamento	83
Figura 54 – Efeito da dispersão de carbonetos sobre o limite de escoamento (0,2%)	83
Figura 55 – Efeito do limite de escoamento e da morfologia da bainita sobre a temperatura de transição de aços bainíticos de baixo carbono	84
Figura 56 – Dimensões da ferramenta de furação por escoamento empregada	90
Figura 57 – Geometria dos corpos de prova	94

Figura 58 – Esquema do sistema de aquisição de sinais de força de avanço e momento torçor	95
Figura 59 – Localização do centro da chapa na superfície superior e posicionamento do termopar na superfície inferior do corpo de prova	97
Figura 60 – Esquema do sistema de aquisição de sinais de temperatura	97
Figura 61 – Localização do termopar na rebarba inferior da bucha escoada após a furação por escoamento	98
Figura 62 – Regiões analisadas por microscopia óptica na bucha escoada	100
Figura 63 – Distribuição dos pontos de medição da microdureza sobre as buchas escoadas	102
Figura 64 – Dispositivo empregado para realizar os ensaios de determinação da carga de resistência máxima média e determinação da classe de resistência da rosca	104
Figura 65 – Gráfico da força de avanço e do momento torçor para a amostra A215	108
Figura 66 – Gráfica da força de avanço e do momento torçor para a amostra A224	108
Figura 67 – Gráfico da força de avanço e do momento torçor para a amostra B215	110
Figura 68 – Gráfico da força de avanço e do momento torçor para a amostra B415	110
Figura 69 – Gráfico da força de avanço e do momento torçor para a amostra B224	111
Figura 70 – Gráfico da força de avanço e do momento torçor para a amostra B424	112
Figura 71 – Gráfico da força de avanço e do momento torçor para a amostra C424.....	112
Figura 72 – Gráfico da temperatura e do gradiente de temperatura para a amostra A233	118
Figura 73 – Gráfico da temperatura e do gradiente de temperatura para a amostra A215	118
Figura 74 – Gráfico da temperatura e do gradiente de temperatura para a amostra B233	119

Figura 75 – Gráfico da temperatura e do gradiente de temperatura para a amostra B433	120
Figura 76 – Gráfico da temperatura e do gradiente de temperatura para a amostra B424	121
Figura 77 – Gráfico da temperatura e do gradiente de temperatura para a amostra C424	121
Figura 78 – Zona termomecanicamente afetada. A – Faixa mais afetada. B – Faixa intermediária. C – Metal-base	124
Figura 79 – Micrografias ópticas das regiões da amostra A215	129
Figura 80 – Micrografias ópticas das regiões da amostra A233.	130
Figura 81 – Micrografia óptica da região da rebarba inferior da amostra A215	130
Figura 82 – Micrografia (MEV) da região da rebarba inferior	131
Figura 83 – Micrografia óptica mostrando o bandeamento dos grãos	131
Figura 84 – Micrografias ópticas das regiões da amostra da amostra C415	132
Figura 85 – Micrografias ópticas das regiões da amostra da amostra C433	133
Figura 86 – Micrografia (MEV) da região inferior	134
Figura 87 – Micrografia (MEV) mostrando a perlita no contorno de grão	134
Figura 88 – Micrografias ópticas das regiões da amostra da amostra B233	135
Figura 89 – Micrografias ópticas das regiões da amostra da amostra B433	136
Figura 90 – Micrografias ópticas das regiões da amostra da amostra A224	138
Figura 91 – Micrografias ópticas das regiões da amostra da amostra B224.....	139
Figura 92 – Micrografias ópticas das regiões da amostra da amostra B424	140
Figura 93 – Micrografias ópticas das regiões da amostra da amostra C424	141
Figura 94 – Gráfico da distribuição da microdureza HV 0,025 da amostra B215	143
Figura 95 – Gráfico da distribuição da microdureza HV 0,025 da amostra B233	143
Figura 96 – Gráfico da distribuição da microdureza HV 0,025 da amostra A215	144
Figura 97 – Gráfico da distribuição da microdureza HV 0,025 da amostra A224	144
Figura 98 – Gráfico da distribuição da microdureza HV 0,025 da amostra A233	144

Figura 99 – Gráfico da distribuição da microdureza HV 0,025 da amostra B224	145
Figura 100 – Gráfico da distribuição da microdureza HV 0,025 da amostra B424	145
Figura 101 – Gráfico da distribuição da microdureza HV 0,025 da amostra B433	147
Figura 102 – Gráfico da distribuição da microdureza HV 0,025 da amostra C433	147
Figura 103 – Deformação do material no fundo do filete da rosca	148
Figura 104 – Deformação do material no flanco do filete da rosca	148
Figura 105 – Deformação do material na crista do filete (garra) da rosca	148
Figura 106 – Micrografia óptica do material-base (a) e da borda do furo da bucha escoada (b) na amostra A224	149
Figura 107 – Perfil da bucha escoada (a) e escoada e roscada (b) produzida em chapa com espessura de 2,65 mm	150
Figura 108 – Perfil da bucha escoada (a) e escoada e roscada (b) produzida em chapa com espessura de 4,75 mm	150
Figura 109 – Macrografias da bucha roscada na amostra A233. (a) Seção da bucha roscada, sem aplicação da carga. (b), (c) Aumento das deformações permanentes em função da carga aplicada. (d) bucha roscada rompida. Somente polidas	154
Figura 110 – Gráfico da tensão real x deformação real dos materiais	157
Figura 111 – Distribuição da tensão equivalente na bucha roscada (s = 4,75 mm)	158
Figura 112 – Deslocamento ocorrido na bucha roscada (s = 4,75 mm)	159
Figura 113 – Tensões desenvolvidas na bucha roscada (s = 4,75 mm)	159
Figura 114 – Detalhe dos elementos da malha original na região da base inferior da bucha, antes da aplicação da carga	160
Figura 115 – Deformação dos elementos da malha e concentração de tensão na região da base inferior da bucha	161
Figura 116 – Deslocamento ocorrido na bucha roscada (s = 2,65 mm)	162
Figura 117 – Tensões desenvolvidas na bucha roscada (s = 2,65 mm)	162
Figura 118 – Deformações na malha em função do carregamento	163
Figura 119 – Dispositivo de fixação dos corpos de prova (material: madeira)	202

Figura 120 – Máquina-ferramenta Romi Polaris F400	203
Figura 121 – Máquina Universal de Ensaio	205

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ocorrência dos mecanismos de início de recristalização	63
Tabela 2 – Condições de trabalho empregadas nos ensaios finais	89
Tabela 3 – Codificação empregada segundo o material e a espessura do corpo de prova	91
Tabela 4 – Codificação empregada nos corpos de prova para identificação do material e das condições de trabalho	92
Tabela 5 – Microestrutura e composição química dos materiais-base das amostras	92
Tabela 6 – Microdureza, diâmetro e fator de forma médios dos grãos dos materiais-base das amostras	93
Tabela 7 – Propriedades mecânicas dos materiais-base das amostras	93
Tabela 8 – Esforços máximos médios atingidos em cada amostra	107
Tabela 9 – Tempo de processo para cada amostras	113
Tabela 10 – Trabalho de conformação	114
Tabela 11 – Temperaturas máximas médias e gradientes de aquecimento e resfriamento atingidos nas amostras	117
Tabela 12 – Dimensões médias e qualidade das buchas escoadas	122
Tabela 13 – Valores médios de diâmetro, fator de forma dos grãos e largura da zona termomecanicamente afetada das amostras A215, A224 e A233	126
Tabela 14 – Valores médios de diâmetro, fator de forma dos grãos e largura da zona termomecanicamente afetada das amostras B215, B224 e B233	126
Tabela 15 – Valores médios de diâmetro, fator de forma dos grãos e largura da zona termomecanicamente afetada das amostras B415, B424 e B433	127
Tabela 16 – Valores médios de diâmetro, fator de forma dos grãos e largura da zona termomecanicamente afetada das amostras C415, C424 e C433	127
Tabela 17 – Carga máxima média de resistência à tração das buchas roscadas nas amostras	151

Tabela 18 – Classes de resistência obtidas pelas buchas roscadas	153
Tabela 19 – Tensões de cisalhamento teóricas desenvolvidas na raiz dos filetes e na seção das chapas	156
Tabela 20 – Parâmetros empregados nas simulações	157
Tabela 21 – Resumo e ANOVA entre os materiais-base empregados, referentes ao diâmetro dos grãos	208
Tabela 22 – Resumo e ANOVA entre os materiais-base empregados, referentes ao fator de forma dos grãos	208
Tabela 23 – Resumo e ANOVA entre as Regiões 1, 2, 3 e 4 da amostra A215, referentes ao diâmetro dos grãos	208
Tabela 24 – Resumo e ANOVA entre as Regiões 1, 2, 3 e 4 da amostra A215, referentes ao fator de forma dos grãos	209
Tabela 25 – Resumo e ANOVA entre as Regiões 1, 2, 3 e 4 da amostra A224, referentes ao diâmetro dos grãos	209
Tabela 26 – Resumo e ANOVA entre as Regiões 1, 2, 3 e 4 da amostra A224, referentes ao fator de forma dos grãos	209
Tabela 27 – Resumo e ANOVA entre as Regiões 1, 2, 3 e 4 da amostra A233, referentes ao diâmetro dos grãos	210
Tabela 28 – Resumo e ANOVA entre as Regiões 1, 2, 3 e 4 da amostra A233, referentes ao fator de forma dos grãos	210
Tabela 29 – Resumo e ANOVA da Região 1 das amostras A215, A224 e A233, referentes ao diâmetro dos grãos	210
Tabela 30 – Resumo e ANOVA da Região 1 das amostras A215, A224 e A233, referentes ao fator de forma dos grãos	211
Tabela 31 – Resumo e ANOVA da Região 2 das amostras A215, A224 e A233, referentes ao diâmetro dos grãos	211
Tabela 32 – Resumo e ANOVA da Região 2 das amostras A215, A224 e A233, referentes ao fator de forma dos grãos	211
Tabela 33 – Resumo e ANOVA da Região 3 das amostras A215, A224 e A233, referentes ao diâmetro dos grãos.....	212
Tabela 34 – Resumo e ANOVA da Região 3 das amostras A215, A224 e A233, referentes ao fator de forma dos grãos	212
Tabela 35 – Resumo e ANOVA da Região 4 das amostras A215, A224 e A233, referentes ao diâmetro dos grãos	212

Tabela 36 – Resumo e ANOVA da Região 4 das amostras A215, A224 e A233, referentes ao fator de forma dos grãos	213
Tabela 37 – Valores da amplitude total estudentizada (q) para $\alpha = 5\%$, segundo o número de tratamentos (k) e os graus de liberdade do resíduo [113]. Parcial	214
Tabela 38 – Resultados do teste Tukey de comparação das médias do diâmetro dos grãos dos materiais-base empregados	214
Tabela 39 – Resultados do teste Tukey de comparação das médias do fator de forma dos grãos dos materiais-base empregados	215
Tabela 40 – Resultados do teste Tukey de comparação individual entre as médias do diâmetro dos grãos das diferentes regiões analisadas das amostras A215, A224 e A233	215
Tabela 41 – Resultados do teste Tukey de comparação entre as médias do diâmetro dos grãos das mesmas regiões analisadas das amostras A215, A224 e A233	216
Tabela 42 – Resultados do teste Tukey de comparação individual entre as médias do fator de forma dos grãos das diferentes regiões analisadas das amostras A215, A224 e A233	216
Tabela 43 – Resultados do teste Tukey de comparação entre as médias do fator de forma dos grãos das mesmas regiões analisadas das amostras A215, A224 e A233	217

SIMBOLOGIA

Letras Maiúsculas

D	[mm]	Tamanho do pacote
D _c	[mm]	Diâmetro da haste
D _i	[mm]	Menor diâmetro da parte ativa da ferramenta
D _g	[mm]	Diâmetro do colar
D _s	[mm]	Diâmetro da ponta da ferramenta
D _z	[mm]	Diâmetro nominal da ferramenta
E	[GPa]	Módulo de elasticidade
F _f	[N]	Força de avanço
F _{f1}	[N]	Força de avanço intermediária de platô
F _{f2}	[N]	Força de avanço mínima
F _{ffinal}	[N]	Força de avanço do final do furo
F _{fmáx}	[N]	Força de avanço máxima
F _{fMÁX.méd}	[N]	Força de avanço máxima média
F _{K Max MED}	[N]	Carga máxima média
G	[MPa]	Módulo de cisalhamento
L _b	[mm]	Comprimento total da bucha
L _{bi}	[mm]	Comprimento da rebarba inferior
L _{br}	[mm]	Comprimento da bucha antes da maior trinca
L _{bs}	[mm]	Comprimento da rebarba superior
L _c	[mm]	Comprimento da haste
L _g	[mm]	Comprimento do colar
L _k	[mm]	Comprimento da parte cônica
L _s	[mm]	Comprimento da ponta
L _t	[mm]	Comprimento total da parte ativa
L _z	[mm]	Comprimento da parte cilíndrica
M _t	[N.m]	Momento torçor
M _{tffinal}	[N.m]	Momento torçor final
M _{t_{máx}}	[N.m]	Momento torçor máximo
M _{tMÁX.méd}	[N.m]	Momento torçor máximo médio

P	[kW]	Potência consumida
Q	[kN]	Carga aplicada
R	mm	Raio de arredondamento da parte ativa da ferramenta
T	-	Tensão da linha de discordância
T _c	[K]	Temperatura de transição
T _f	[K]	Temperatura de fusão absoluta
W _F	[J]	Trabalho total de conformação
W _R	[J]	Trabalho de rotação
W _T	[J]	Trabalho de translação

Letras Minúsculas

b	[mm]	Vetor de Burgers
d	[μ m]	Diâmetro de grão
d _b	[mm]	Tamanho da ripa de bainita
d _c	[mm]	Diâmetro da célula
d _i	[mm]	Diâmetro do furo da bucha
d _r	[mm]	Largura da ripa
d.m.s.	-	Diferença mínima significativa
e _p	[mm]	Espessura da parede da bucha
f	[%]	Fração volumétrica das partículas
f _b	[%]	Fração volumétrica da fase b
f _r	[%]	Fração de grãos recristalizados
ℓ	[mm]	Comprimento total da bucha
n	[min ⁻¹]	Rotação
n _c	-	Número de carbonetos por mm ²
q	-	Valor tabelado ao nível de significância estabelecido
r	[mm]	Raio das partículas
ri	-	Número de repetições do tratamento i
rj	-	Número de repetições do tratamento j
s	[mm]	Espessura da chapa ou tubo
S _f	-	Fator de forma
s _i	[mm]	Espaçamento interlamelar

t	-	Fator de triaxialidade
v_c	[m/min]	Velocidade de corte
v_f	[mm/min]	Velocidade de avanço
\bar{x}	[mm]	Diâmetro médio das partículas

Letras gregas

β_k	[graus]	Ângulo de ponta
γ_k	[graus]	Ângulo de cone
δ	%	Profundidade de ruptura da rebarba
θ	[rad]	Desorientação entre as ripas
λ	[mm]	Espaçamento entre partículas
ν	-	Coefficiente de Poisson
ρ	[mm/mm ³]	Densidade de discordâncias
ρ_{tot}	[mm/mm ³]	Densidade de discordâncias total
ρ_o	[mm/mm ³]	Densidade de discordâncias dentro das ripas
σ	-	Desvio-padrão
σ	[MPa]	Tensão de tração
σ_e	[MPa]	Tensão equivalente
σ_i	[MPa]	Tensão de fricção
σ_o	[MPa]	Tensão de escoamento devido a outros mecanismos de aumento da resistência
σ_s	[MPa]	Limite de escoamento da matriz
σ_y	[MPa]	Limite de escoamento
σ_y^a	[MPa]	Limite de escoamento da fase a
σ_y^b	[MPa]	Limite de escoamento da fase b
σ_u	[MPa]	Tensão real máxima
σ_1	[MPa]	Tensão principal na direção 1
σ_2	[MPa]	Tensão principal na direção 2
σ_3	[MPa]	Tensão principal na direção 3

ω [s⁻¹] Velocidade angular da ferramenta

Abreviaturas

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABNT 1006	-	Aço com 0,06% de carbono (norma ABNT)
ABNT 1010	-	Aço com 0,10% de carbono (norma ABNT)
ANOVA	-	Análise de variância
Al ₂ O ₃	-	Óxido de Alumínio (Alumina)
ARBL	-	Alta resistência baixa liga
CNC	-	Computer Numeric Control
COSIPA	-	Companhia Siderúrgica Paulista
CSN	-	Companhia Siderúrgica Nacional
DIN	-	Deutsche Industrie Normen
EDE	-	Energia de falha de empilhamento
FdKS	-	Pasta lubrificante para furação por escoamento
FtMA	-	Óleo lubrificante para rosqueamento por conformação
HB	-	Dureza Brinell
HSC	-	High speed cutting
HSLA	-	High strength low alloy
HV	-	Dureza Vickers
IF	-	Interstitial free
IPL	-	Institut für Produktionstechnik und Logistik (Alemanha)
LABCONF	-	Laboratório de Conformação - UFSC
LabMat	-	Laboratório de Materiais – UFSC
LabMetro	-	Laboratório de Metrologia – UFSC
LEMM	-	Laboratório de Ensaios Mecânicos e Metalúrgicos – UNIJUÍ
LMP	-	Laboratório de Mecânica de Precisão – UFSC
M12	-	Rosca métrica de 12 mm de diâmetro
MEV	-	Microscopia eletrônica de varredura
P35	-	Classe de metal-duro
P40	-	Classe de metal-duro

PVD	-	Physical Vapour Deposition
QMR	-	Quadrado médio de resíduo da análise de variância
SAE 1008	-	Aço com 0,08% de carbono (norma SAE)
SAE 1012	-	Aço com 0,12% de carbono (norma SAE)
SAE	-	Society of American Engineers
Si ₃ N ₄	-	Nitreto de Silício
St	-	Stahl (Aço)
St 37	-	Aço de baixo carbono (norma DIN)
TiC	-	Carboneto de titânio
TiN	-	Nitreto de titânio
Ti(CN)	-	Carbonitreto de titânio
(Ti,Al)N	-	Nitreto de Titânio e Alumínio
UFSC	-	Universidade Federal de Santa Catarina
UNIJUÍ	-	Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul
UniMETRO	-	Laboratório de Metrologia – UNIJUÍ
USICON	-	Laboratório de Usinagem e Comando Numérico - UFSC
ZTA	-	Zona termomecanicamente afetada

RESUMO

ECKHARDT, Moacir. **Relação entre processo, microestrutura e propriedades mecânicas na furação por escoamento de aços de baixo carbono**. Florianópolis: UFSC, 2003. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

A furação por escoamento, processo pelo qual são geradas buchas escoadas em chapas e perfis em diversos materiais, possui como característica principal a obtenção de buchas sem a remoção de material. As buchas são produzidas através do emprego de uma ferramenta rotativa, normalmente de metal-duro, que pressionada contra o material da peça produz calor por atrito e deformação, provocando o amolecimento do material e seu escoamento durante a sua penetração. As buchas escoadas são empregadas em diversas aplicações industriais, sendo a mais comum em uniões removíveis, onde se faz necessária a confecção de rosca pelo processo de rosqueamento por conformação. Este trabalho tem como objetivo relacionar os parâmetros de trabalho do processo de furação por escoamento com as alterações na microestrutura do material-base, e relacionar as alterações na microestrutura com as propriedades mecânicas de buchas escoadas. O estudo foi desenvolvido através da realização de ensaios experimentais de furação por escoamento empregando-se ferramenta de metal-duro e aços de baixo carbono. Foram analisadas as influências das condições de trabalho (rotação e velocidade de avanço) e da variação do teor de carbono e espessura do material sobre as características do processo (força de avanço, momento torçor, potência, temperatura e tempo de processo) e a influência das características do processo sobre os resultados do processo (dimensões principais, microdureza e transformações microestruturais). Além desses, foram determinadas a carga máxima de resistência das buchas escoadas e a classe de resistência da rosca obtida nas buchas através de ensaios de tração, permitindo uma avaliação das relações entre as transformações microestruturais e as propriedades mecânicas. Independente da espessura do material e do teor de carbono, o emprego das condições de trabalho mais severas durante a furação por escoamento promoveram a obtenção de buchas com geometria e alterações microestruturais mais adequadas à elevação da resistência mecânica, além do processo se desenvolver mais rapidamente. Como conclusão pode-se afirmar, para a maioria das análises realizadas, haver um relacionamento termomecânico entre o processo de furação por escoamento, as alterações promovidas na microestrutura do material-base e as propriedades mecânicas resultantes.

Palavras-chave: furação por escoamento - rosqueamento por conformação – transformações microestruturais – propriedades mecânicas

ABSTRACT

ECKHARDT, Moacir. **Inter-relationship of process, microstructure and mechanical properties in flowdrilling mild steels**. Florianópolis: UFSC, 2003. Doutorate Thesis, Postgraduate Program of Mechanical Engineering, Federal University of Santa Catarina, 2003.

The main characteristic of flowdrilling process used to obtain bushes in metal sheets and tubes is chipless during the bush formation. The bushes are produced by means of a rotary tool with special geometric shape, which presses against the workpiece surface and promotes heating by friction and plastic deformation so as to soften and flow the material during the tool penetration. Such bushes have been widely used for industries, mainly for removable jointing where there is the requirement of chipless tapping, a cold forming process called flowtapping. The origination of this work attempts to correlate the flowdrilling work parameters to the changes in the primitive microstructure of the material, and consequently to the resulted alterations in the mechanical properties. The investigation was undertaken through experimental test by employing a hard metal flowdrilling tool and mild steel. The influence of the process parameters and the variations of chemical composition of material and sheet thickness on the process characteristics (axial drive force, torque moment, power, temperature and process time) and the effect of process characteristics on the process results (main dimension, microhardness and microstructural transformations) were investigated under the condition of constants work parameters. Besides those, the strength of the bushes and the thread strength classification were determined by tensile test, allowing for the evaluation of the relation between the microstructural transformations and the mechanical properties. The results show that regardless of sheet thickness and carbon content, the adoption of most severe work conditions during flowdrilling could promote, besides more quickly processing, the attainment of bushes with better geometry and better microstructural alterations to the enhancement of the mechanical performance. In conclusion, it can be affirmed by the obtained results that there is a thermomechanical relationship, in the most of analyses made, among the flowdrilling process, the changes in microstructure and the mechanical properties.

Key-words: flowdrilling – flowtapping - microstructural transformations - mechanical properties.

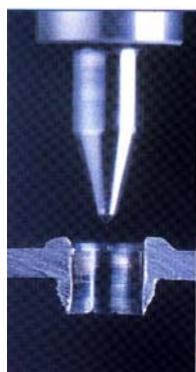
1 INTRODUÇÃO

O processo de furação por escoamento destina-se à obtenção de buchas escoadas em chapas finas ou peças de pequena espessura e, apesar de não ser uma tecnologia recente, já que a primeira tentativa de produzir-se furos por este processo data de 1923 [1], ainda está em desenvolvimento.

Na furação por escoamento uma ferramenta de geometria específica (figura 1), com alta rotação, é pressionada contra o material produzindo calor e provocando o escoamento do material. O material assim escoado forma uma bucha (figura 2a), que pode ser utilizada, por exemplo, como ponto de fixação por brasagem ou roscada (figura 2b), servindo como ponto de união para fixações por parafuso [1,2].



Figura 1 – Ferramenta de furação por escoamento de metal-duro [3].



a) Bucha escoada



b) Bucha roscada

Figura 2 – Resultados da aplicação dos processos de furação por escoamento e rosqueamento por conformação [3].

A furação por escoamento, em combinação com o rosqueamento por conformação, constitui uma alternativa às soluções convencionais de uniões removíveis, como o emprego de rebites ou porcas soldadas [1]. A utilização deste processo ocorre, principalmente, em materiais dúcteis, onde destacam-se os aços de baixo carbono.

Testes de resistência em buchas escoadas e roscadas por conformação têm apresentado melhores resultados quando comparados a furos roscados por usinagem. Esta diferença pode ser atribuída às alterações microestruturais relacionadas com transformação de fases, recuperação, recristalização e refino de grão na furação por escoamento, em conjunto com o encruamento localizado do material no rosqueamento por conformação.

Estas transformações estruturais, como em outros processos de conformação, variam para cada material utilizado e dependem fortemente do estado inicial do material-base, das condições de trabalho, do diâmetro da ferramenta e da espessura da chapa, as quais determinam os níveis de deformação e energia térmica aplicados durante o processo.

De maneira geral, as propriedades mecânicas, físicas e químicas dos materiais são definidas por sua composição química e por sua microestrutura. A otimização da microestrutura tem um papel importante podendo resultar na melhoria das propriedades mecânicas, na redução de etapas de processos, na diminuição da possibilidade de falhas do material em serviço e, também, na redução de custos [4, 5].

Pelo exposto acima, fica evidenciada a importância de realizar-se estudos para a determinação da evolução microestrutural e de propriedades mecânicas na furação por escoamento e rosqueamento por conformação, visando o entendimento do seu relacionamento, e dos mecanismos e fenômenos metalúrgicos envolvidos no processo.

Neste trabalho foram investigadas as influências dos parâmetros de trabalho do processo de furação por escoamento, mais especificamente da velocidade de avanço e da rotação da ferramenta, sobre a evolução da microestrutura na região termomecanicamente afetada de buchas escoadas em aços de baixo carbono laminados a quente, onde são variados os teores de carbono e a espessura das chapas, e a influência das alterações microestruturais sobre as características mecânicas de buchas roscadas por conformação.

Os estudos da influência termomecânica do processo sobre aços de baixo carbono já realizados verificaram a microestrutura nas regiões deformadas de buchas escoadas e determinaram a resistência mecânica das buchas roscadas. Entretanto, este trabalho visa estabelecer um padrão de comportamento entre os parâmetros de trabalho empregados, as transformações microestruturais e as alterações nas propriedades mecânicas resultantes do trabalho termomecânico realizado sobre o material durante a furação por escoamento e rosqueamento por conformação.

A seguir, no capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica onde são abordados aspectos gerais do processo de furação por escoamento e rosqueamento por conformação, juntamente com um resumo dos mecanismos de encruamento, recuperação e recristalização, e da relação entre as microestruturas dos aços e algumas propriedades mecânicas, como limite de escoamento e tenacidade. Nos capítulos 3 e 4 são apresentados, respectivamente, os objetivos propostos pelo trabalho e o planejamento para realização dos experimentos. O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos e, no capítulo 6, é realizada a análise dos resultados, relacionando as características do processo advindas dos parâmetros de trabalho com as alterações microestruturais e estas com as propriedades mecânicas das buchas escoadas. As conclusões do trabalho e as sugestões de continuidade são apresentadas no capítulo 7.

2 ESTADO DA ARTE

Neste capítulo é realizada uma revisão dos processos de furação por escoamento e rosqueamento por conformação, objetos deste trabalho. Durante o processo de furação por escoamento, ocorrem altas taxas de deformação e uma grande elevação da temperatura na região de trabalho. Estas características do processo podem acarretar alterações metalúrgicas no material como recuperação, recristalização e mesmo transformações microestruturais, o que leva a também se fazer uma revisão sobre estes, abordando aspectos morfológicos e a influência nas características mecânicas do material.

2.1 Furação por Escoamento

2.1.1 O processo de furação por escoamento

A furação por escoamento é um processo de fabricação de furos, onde uma ferramenta cilíndrica, de metal-duro e ponta cônica, penetra em peças de paredes finas com alta rotação e com avanços constantes ou não. Durante a penetração da ferramenta a peça é aquecida por atrito e por deformação plástica pela passagem dos lóbulos da ferramenta, diminuindo a resistência à deformação do material [6]. O material da peça escoam nas direções axial e radial, sendo então conformado numa bucha (figura 3) [1,7-10].

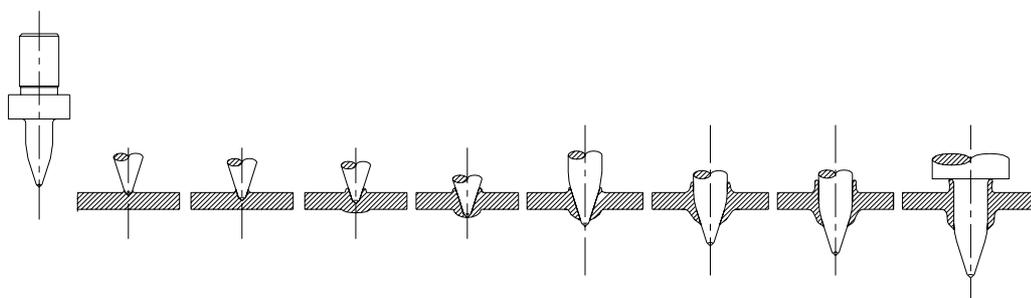


Figura 3 - Seqüência da conformação de uma bucha pelo processo de furação por escoamento [7,10-12].

2.1.2 Aplicações do processo

O processo de furação por escoamento, devido às suas características, tem sido introduzido nas mais diversas aplicações da área industrial, e nos seus mais diversos segmentos, como [1,6,11]:

- Automobilístico;
- Eletrodoméstico;
- Bicicletas;
- Moveleiro;
- Equipamentos para ginástica;
- Máquinas agrícolas e, mais recentemente,
- Na indústria de equipamentos hidráulicos e pneumáticos, e
- Na construção civil, em galpões.

As figuras 4 a 10 apresentam exemplos de aplicações do processo de furação por escoamento [3,13-20].



Figura 4 - Colunas de direção de veículos automotores.



Figura 5 - Conexão de tubos de cobre.



Figura 6 - Sistema de eixo frontal de veículos automotores.



Figura 7 - Buchas roscadas para fixar niveladores.



Figura 8 - Buchas roscadas em vasos de pressão.

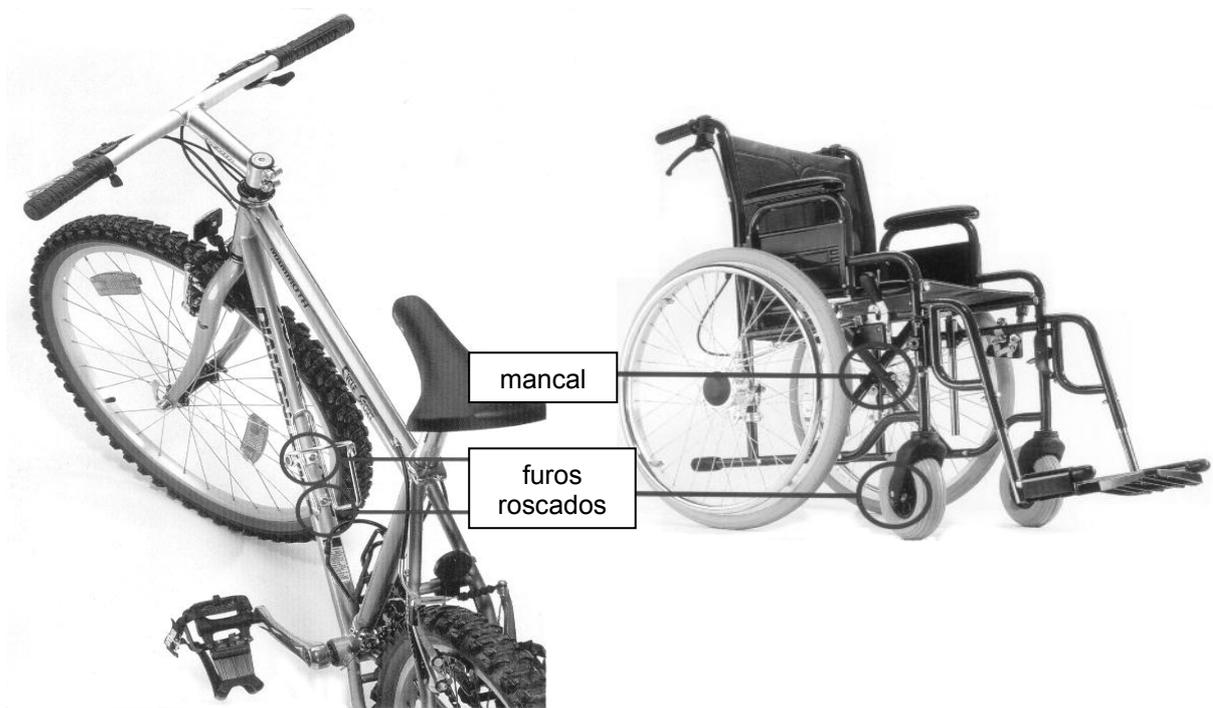


Figura 9 – Quadro de bicicletas e cadeiras de rodas.

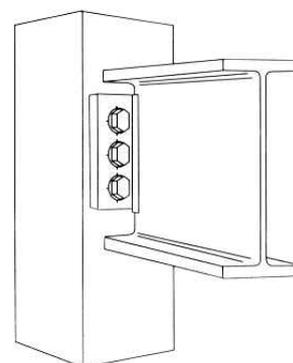
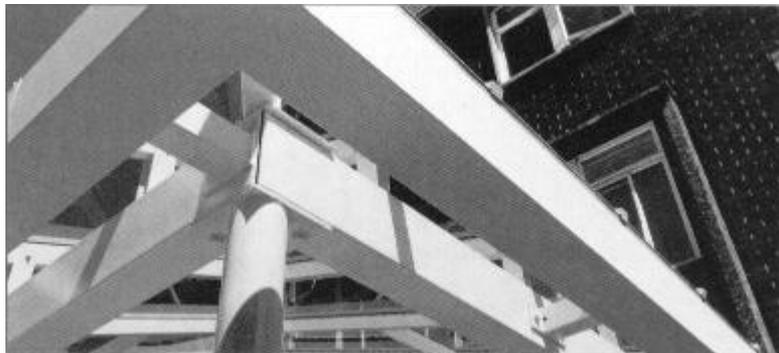


Figura 10 - Estruturas metálicas.

2.1.3 Tecnologia do processo de furação por escoamento

As principais grandezas e resultados de trabalho do processo de furação por escoamento estão apresentados na figura 11, abaixo.

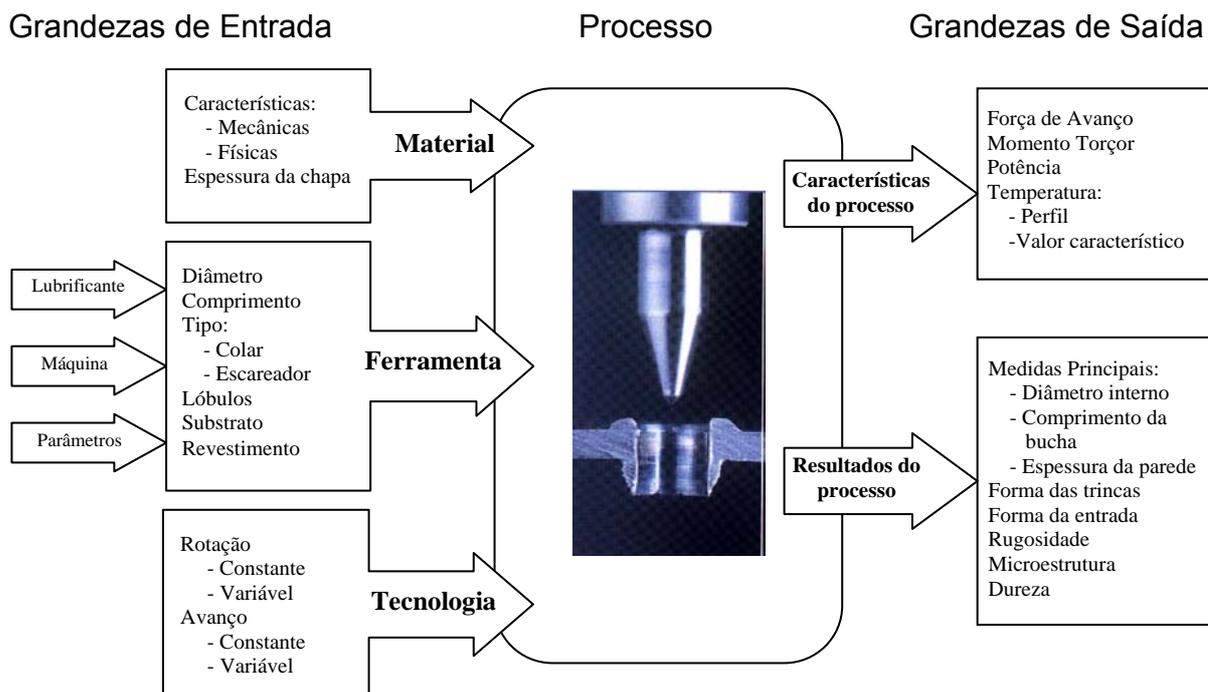


Figura 11 - Principais grandezas de entrada, características e resultados do processo de furação por escoamento [3,10,11,21-23].

2.1.4 Grandezas de entrada

Na furação por escoamento podem ser utilizadas tanto máquinas-ferramentas convencionais, desde que apresentem rigidez, potência e rotação adequadas, quanto máquinas-ferramentas CNC. As máquinas-ferramentas CNC, devido à possibilidade de programação, permitem uma otimização dos resultados de trabalho e do tempo de processo [1,24,25].

Com relação à peça devem ser consideradas as características do material, as suas propriedades termomecânicas, a geometria e a distância entre os furos [1,10]. A princípio todos os materiais dúcteis podem ser submetidos ao processo de furação por escoamento, como chapas finas soldáveis de aços, com adição de elementos de liga ou não, ligas de alumínio, cobre, bronze, metais magnéticos e ligas especiais, além de termoplásticos [2,8,23,26-28].

A ferramenta de furação por escoamento possui a geometria apresentada na figura 12. Esta geometria é responsável pelo deslocamento localizado do material da peça, gerando calor [1,2]. As partes fundamentais consideradas são a parte ativa composta pela ponta, parte cônica e parte prismática, o colar e a haste.

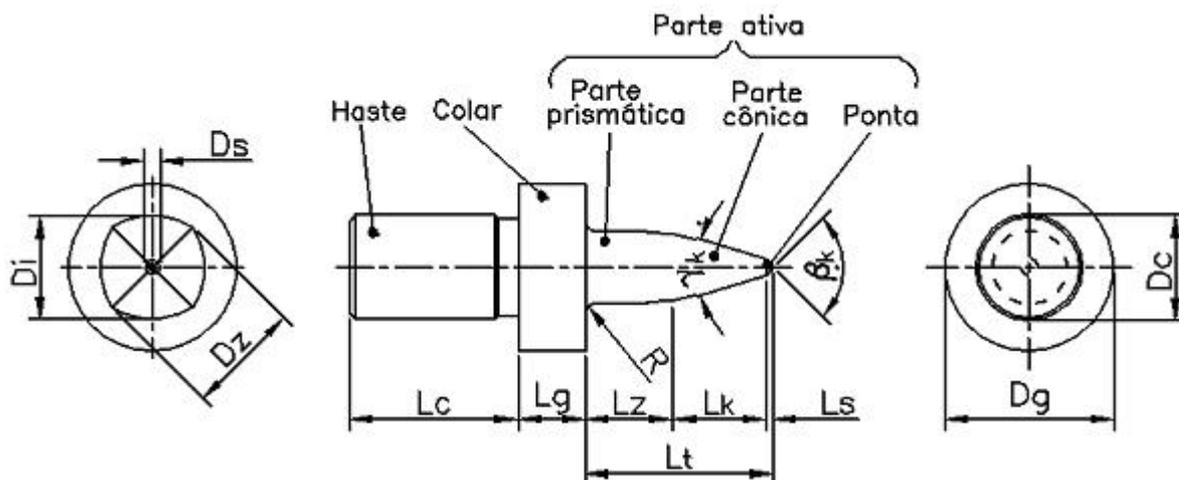


Figura 12 - Geometria da ferramenta de furação por escoamento [2,11,23].

Na parte ativa da ferramenta, a ponta é a região de maior solicitação. Trabalhos demonstram que durante o processo a etapa de maior força axial está justamente antes do início do rompimento da chapa quando a ponta da ferramenta está totalmente dentro do material [2]. A ponta pode apresentar gumes que realizam a usinagem prévia da chapa antes da conformação, esta configuração é utilizada para materiais com uma camada superficial indesejável ou para reduzir a força axial durante o processo. Com a retirada deste material a bucha formada possui um comprimento total menor [2]. A parte cônica e a parte prismática da ferramenta possuem uma seção transversal lobular, também chamada poligonal, sendo que a geometria e o número de lóbulos variam de um fabricante para outro, podendo apresentar 3, 4, 6 e até 8 lóbulos salientes [1,2]. Em dependência do comprimento de sua parte ativa, a ferramenta é classificada em longa, curta ou super curta [1,2]. Estas variações do comprimento da parte ativa possibilitam a obtenção de buchas escoadas com formatos cilíndrico ou cônico.

O colar da ferramenta, além servir como um apoio no mandril da máquina-ferramenta, pode ser empregado para conformar ou, no caso de possuir gumes, escarear a rebarba superior da bucha escoada. A haste tem o objetivo básico de servir como fixação da ferramenta a um dispositivo adequado na máquina-ferramenta.

Na figura 13 podem ser visualizados os tipos de ferramentas de furação por escoamento e os formatos de buchas obtidos em função da variação da geometria da ferramenta.

A geometria da ferramenta está sendo estudada procurando sua adequação

não apenas à espessura das chapas, mas também aos diferentes materiais aos quais o processo é adequado [1].

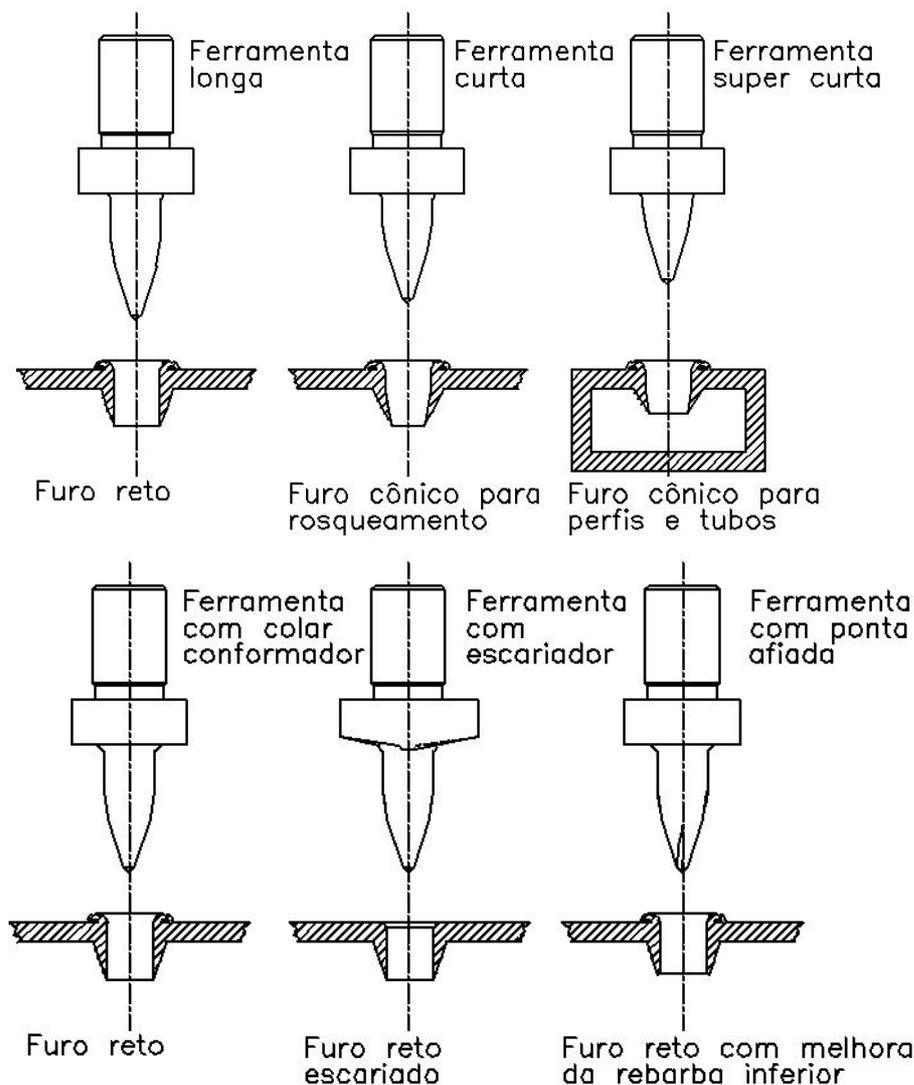


Figura 13 – Tipos de ferramentas de furação por escoamento e formatos de buchas obtidos [2,32].

Comercialmente podem ser encontradas ferramentas confeccionadas em diâmetros que variam entre 3 e 30 mm [7,23], mas também existem ferramentas especiais com diâmetros de até 50 mm [7].

As ferramentas de furação por escoamento normalmente são confeccionadas em metal-duro das classes P20, P35 ou P40 [2,5,7,23,29] e Cermet [10,25]. Já existem disponíveis no mercado ferramentas revestidas com (TiAl)N e com diamante [5,21,30,31]. Materiais cerâmicos como o óxido de alumínio (Al_2O_3) e o nitreto de

silício (Si_3N_4) estão sendo estudados [1,5,30,32].

Na maioria das aplicações da furação por escoamento, o fim de vida da ferramenta é determinado pela sua quebra total [32]. Apenas em aplicações de baixa sollicitação da ferramenta foi observado que o fim de vida pode ser avaliado pelo desgaste na ponta da ferramenta que leva à geração de buchas com uma pior qualidade da rebarba. Em termos de vida da ferramenta, podem ser esperados valores na faixa de 8.000 a 15.000 furos para ferramentas de metal duro [3,13,32] e de 155.000 furos para ferramentas revestidas com $\text{Ti}(\text{Al})\text{N}$ [31,32].

Para a redução do atrito entre a ferramenta e a peça, são empregados lubrificantes na forma líquida ou na forma de pasta, compostos basicamente de sulfeto de zinco (ZnS) [1,2,31] que, segundo o fabricante, mantém sua eficiência na faixa de temperatura de -20°C a 1150°C . Os lubrificantes devem ser aplicados na superfície da ferramenta antes de cada furo. O lubrificante pastoso normalmente é aplicado de forma manual, já o líquido pode ser utilizado em sistemas de lubrificação automáticos [1,2]. Também estão sendo utilizados sistemas de minimização da quantidade de lubrificante [5,33].

As variáveis de entrada na furação por escoamento são comparáveis às da furação convencional. A velocidade de avanço (v_f) é responsável pelo movimento de penetração da ferramenta na peça. A velocidade de corte é substituída na furação por escoamento pela velocidade tangencial da ferramenta. Em rotação constante ela varia na parte cônica da ferramenta e logo em seguida se torna constante, em função da entrada em ação da parte prismática [1,2,10].

As condições de trabalho são determinadas em função do diâmetro da ferramenta, do material e da espessura da chapa a ser trabalhada [2,24].

2.1.5 Características do processo

O comportamento da furação por escoamento basicamente pode ser caracterizado pela força de avanço e pelo momento torçor [2,11]. Estes esforços dependem basicamente 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 [1,21].

Com o aumento da velocidade de avanço são impostas maiores taxas de

deformação, aumentando a força de avanço. A maior taxa de deformação diminui o tempo disponível para que o material adquira plasticidade após o contato inicial da ferramenta [2]. A utilização de rotações mais elevadas aumenta a quantidade de energia fornecida ao material da peça devido ao trabalho de deformação radial, fazendo com que adquira plasticidade rapidamente, sendo facilmente conformado com baixos níveis de força de avanço [1,21].

O momento torçor fornece a maior parcela de energia empregada para a execução do processo [1,21,34], e é função da rotação, do material e da espessura da chapa [1,21]. Com o aumento da velocidade de avanço e da rotação o momento torçor aumenta proporcionalmente, assim como a utilização de materiais de maior resistência mecânica e de maior espessura [21].

a) Cinemática do processo

A cinemática do processo de furação por escoamento refere-se ao comportamento da força de avanço e do momento torçor, em dependência das variáveis de entrada [1,35].

Tradicionalmente a cinemática do processo foi 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, através do emprego de máquinas manuais de coluna ou de mesa [1,2,35,36]. Em função dos longos tempos de processo, é viável apenas para pequenas séries de peças [1,37].

O segundo caso refere-se à utilização de velocidade de avanço constante, em máquinas-ferramentas convencionais ou CNC, onde a força de avanço e o momento torçor variam ao longo do tempo [1,35].

Atualmente, pode ser considerado um terceiro caso que compreende o uso de máquinas-ferramentas CNC, as quais possibilitam a variação em processo da velocidade de avanço e da rotação. 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 [1,24,35].

Na figura 14 [1,21,24] estão ilustradas curvas típicas de F_f (força de avanço) e M_t (momento torçor) para o caso mais comum onde se emprega velocidade de avanço constante. As diferentes fases do processo são definidas a partir de pontos marcantes sobre a curva das duas grandezas.

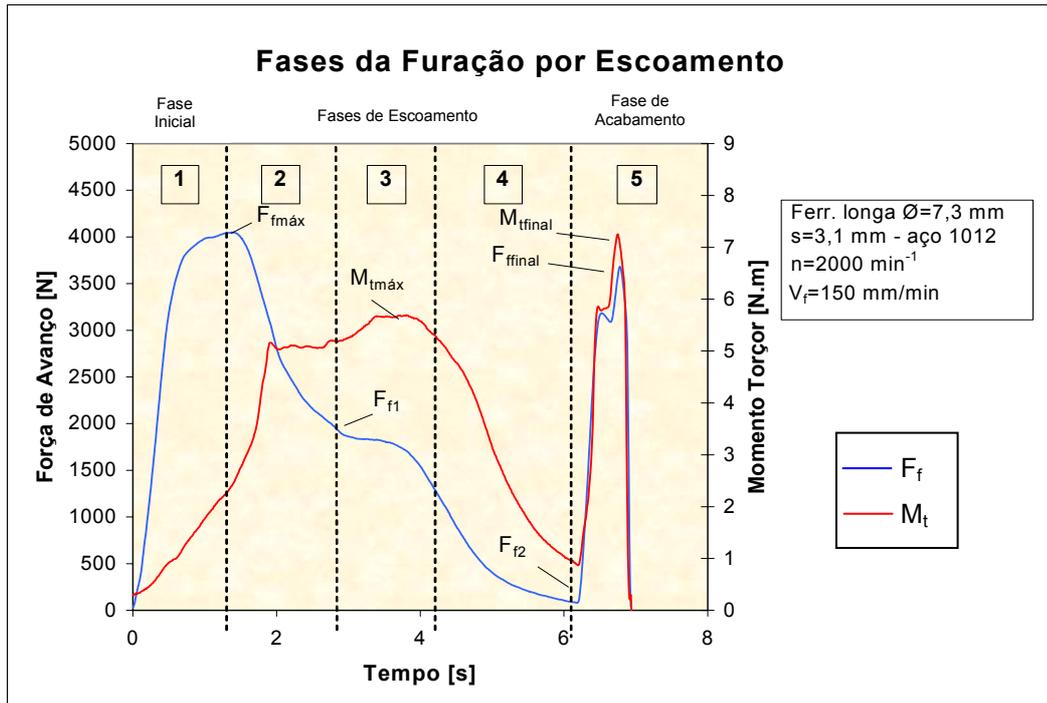


Figura 14 - Fases da furação por escoamento [1,21,24].

- Fase inicial (1)

Com a entrada da ponta da ferramenta na peça, a força de avanço cresce linearmente, sendo o material inicialmente deformado na direção contrária ao avanço. O momento torçor segue comportamento semelhante, devido ao aumento da área de contato entre a ferramenta e a peça. Na superfície inferior da chapa gradativamente se forma uma protuberância.

- Fases de escoamento (2, 3, 4)

Após o valor máximo de força de avanço, $F_{fmáx}$, ser atingido, inicia-se o escoamento generalizado do material. A elevação da temperatura da peça diminui a resistência ao escoamento do material, ao longo da fase 2. Após a ponta da ferramenta atravessar a chapa a força de avanço atinge o valor F_{f1} , permanecendo neste patamar. Durante a fase 2 e em boa parte da fase 3 o momento torçor permanece crescente, atingindo o seu valor máximo, $M_{tmáx}$, 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, a força de avanço diminui. O seu valor mínimo F_{f2} no final desta fase determina o início da fase final.

- Fase final (5)

A parte final da conformação da bucha se caracteriza pelo tratamento da rebarba superior, que pode ser retirada ou conformada. O contato dos gumes ou do colar na superfície da peça leva aos picos de força de avanço, F_{ffinal} , e momento torçor, M_{tfinal} . Estes valores são maiores em ferramentas com colar conformador em comparação com as de gumes escareadores.

Duarte Filho [1], realizando ensaios em chapas de aço SAE 1012 laminadas a quente, com 3,0 mm de espessura e empregando uma ferramenta longa com colar conformador com 7,3 mm de diâmetro, encontrou valores de força de avanço máxima, $F_{fmáx}$, de 3960 N e de momento torçor máximo, $M_{tmáx}$, de 3,4 Nm para condições de trabalho constantes e para condições variáveis em processo valores de 4720 N e 8,8 Nm, respectivamente.

Heiller [24], empregando condições de trabalho constante, obteve força de avanço máxima, $F_{fmáx}$, de 4600 N e momento torçor máximo, $M_{tmáx}$, de 4,0 Nm, com ferramenta curta de 9,2 mm de diâmetro, em um aço St 37 com 3,0 mm de espessura. Com condições de avanço variável o valor para a força de avanço máxima, $F_{fmáx}$, foi de 4760 N, e para o momento torçor máximo, $M_{tmáx}$, de 12,6 Nm.

b) Potência mínima requerida

Para a realização do processo a árvore da máquina-ferramenta deve fornecer uma potência mínima necessária, cujo valor depende de $M_{tmáx}$. O cálculo da potência mínima de acionamento é realizado para o $M_{tmáx}$ da fase de escoamento devido aos esforços de torque, nesta etapa, solicitarem o eixo-árvore da máquina por um tempo mais longo.

A potência de acionamento mínima requerida durante o processo pode ser obtida pela equação 1 [1,2,34,38].

$$P = M_{tmáx} \cdot \omega \quad [\text{kW}] \quad (1)$$

onde ω é a velocidade angular da ferramenta.

c) Trabalho de conformação

A energia mecânica introduzida no processo é composta de uma pequena parcela de atrito dinâmico entre a ferramenta e a peça, e na maior parte devido 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) [1,2,34,37,38].

Através da integração dos valores de força de avanço e momento torçor, em função do deslocamento (trabalho de translação W_T) e da rotação e do tempo (trabalho de rotação W_R), equações 2 e 3, respectivamente, determina-se a quantidade de energia mecânica introduzida no processo através do trabalho de conformação, W_F , equação 4 [1,2,34,38].

$$W_T = \frac{v_f}{6.10^{-4}} \int_{t_1}^{t_2} F_f \cdot dt \quad [\text{J}] \quad (2)$$

$$W_R = \frac{\pi}{30} \cdot n \int_{t_1}^{t_2} M_t \cdot dt \quad [\text{J}] \quad (3)$$

$$W_F = W_R + W_T \quad [\text{J}] \quad (4)$$

O trabalho de rotação corresponde a cerca de 99% do trabalho total de conformação, ou seja, $W_R \gg W_T$ [1,2,34].

Duarte Filho [1], em seus ensaios em aço SAE 1012 com 3,0 mm de espessura, verificou que a maior introdução de energia mecânica ocorreu para as amostras confeccionadas com valores de rotação mais elevados (6000 min^{-1}), sendo que, quando empregadas velocidades de avanço constantes, o valor máximo do trabalho de rotação atingiu aproximadamente o dobro do valor máximo obtido pelas amostras confeccionadas com velocidade de avanço variável [1]. Os trabalhos de Kretschmer [36,37], Müller-Kraus [34] e de Duarte Filho [1] também apresentaram valores extremamente elevados para o trabalho de rotação, W_R , em comparação com os valores obtidos para o trabalho de translação, W_T .

d) 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 [1,2,22].

Segundo Lopes [6], para cada diferente fase do processo as fontes predominantes de geração de calor variam, conforme mostrado esquematicamente na figura 15.

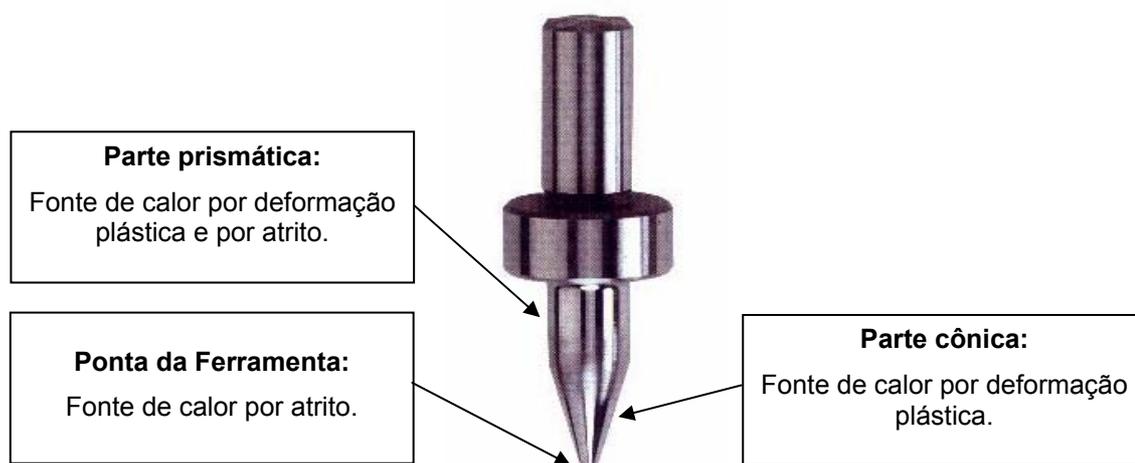


Figura 15 – Predominância da(s) fonte(s) geradora(s) de calor de acordo com as partes da ferramenta [6].

Desde o início das pesquisas, diversos métodos experimentais de medição têm sido utilizados para a determinação das temperaturas atingidas pelo processo de furação por escoamento, tais como bastões de cores, pirômetros infravermelhos, termopares e termocâmeras [1,2,6,22,23,27,36,37]. Sais de metais pesados e cristais líquidos são citados como métodos alternativos viáveis [36].

Além dos métodos experimentais, também podem ser empregados métodos matemáticos para estimar teoricamente a temperatura máxima na interface peça-ferramenta, a partir dos dados máximos de temperatura medidos em pontos afastados radialmente do centro do furo da bucha [36].

Dos diversos métodos experimentais citados, os termopares são os mais empregados para a medição das temperaturas geradas, pois este método mostrou-se mais adequado em função das condições impostas pelo processo [1,37].

Em estudos realizados por Kretschmer [37], Lopes [5], Heiler [22] e Duarte Filho [1], dependendo das condições de trabalho empregadas, foram encontradas variações de temperatura máxima entre 490°C e 888°C. Nestes estudos foram utilizadas chapas de aço de baixo carbono com espessuras de 2,0 e 3,0 mm e ferramentas variando de 5,4 a 12,0 mm de diâmetro.

e) Tempo de desenvolvimento do processo

O tempo principal de produção de uma bucha pela furação por escoamento é uma grandeza de grande importância tecnológica e relevância econômica [1,2]. 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.

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 pode reduzir o tempo principal de 10% a 30%, aproximadamente [1].

Uma solução mais recente foi obtida com a utilização de máquinas-ferramentas CNC e de maiores velocidades de avanço ou de velocidades de avanço variáveis em processo, quando então o tempo principal pode ser drasticamente reduzido [1,24]. Duarte Filho [1], utilizando máquina-ferramenta CNC e velocidades de avanço variáveis em processo obteve uma redução de cerca de 55% no tempo principal da furação por escoamento quando comparado com condições constantes. Heiller [22,24], aplicando esta tecnologia, obteve redução de até 75% no tempo principal.

2.1.6 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.

a) 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 [1,2].

Como dimensões principais da bucha têm-se a espessura de parede e_p , o diâmetro do furo da bucha, d_i , e o comprimento total da bucha, ℓ , ilustrados na figura 16.

Em experimentos anteriores [2,24] verificou-se que o comprimento da bucha,

quando são utilizadas velocidades de avanço constantes, não é afetado de maneira significativa pelas condições de trabalho. Porém, a utilização de altas rotações e baixas velocidades de avanço favorece a obtenção de buchas mais longas, que não chegam a influenciar o rosqueamento por conformação nem a resistência à tração da bucha roscada [24]. A utilização de parâmetros de trabalho variáveis em processo, no entanto, favorece a obtenção de buchas de menor comprimento e maior espessura de parede [1].

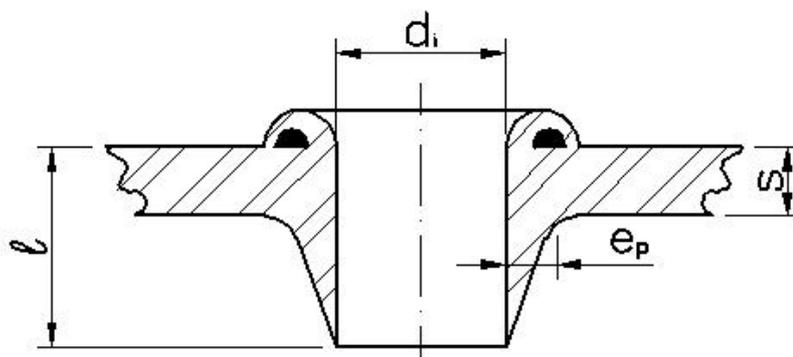


Figura 16 - Dimensões principais da bucha escoada [2].

b) Qualidade das rebarbas inferiores

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

A qualidade é determinada segundo um sistema de classificação criado por Lopes [2] e, posteriormente, otimizado por Heiler [24]. Nesse sistema a qualidade das rebarbas corresponde, dentro de faixas determinadas, à porcentagem δ do comprimento total l da bucha, que é atingida pela profundidade da ruptura formada na extremidade inferior da rebarba.

As profundidades de ruptura máximas admissíveis para cada grupo de qualidade são mostradas na figura 17.

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 $\delta \geq 50\%$ praticamente não há mais área disponível para o rosqueamento e a forma da bucha se aproxima à de uma coroa [1,2,24].

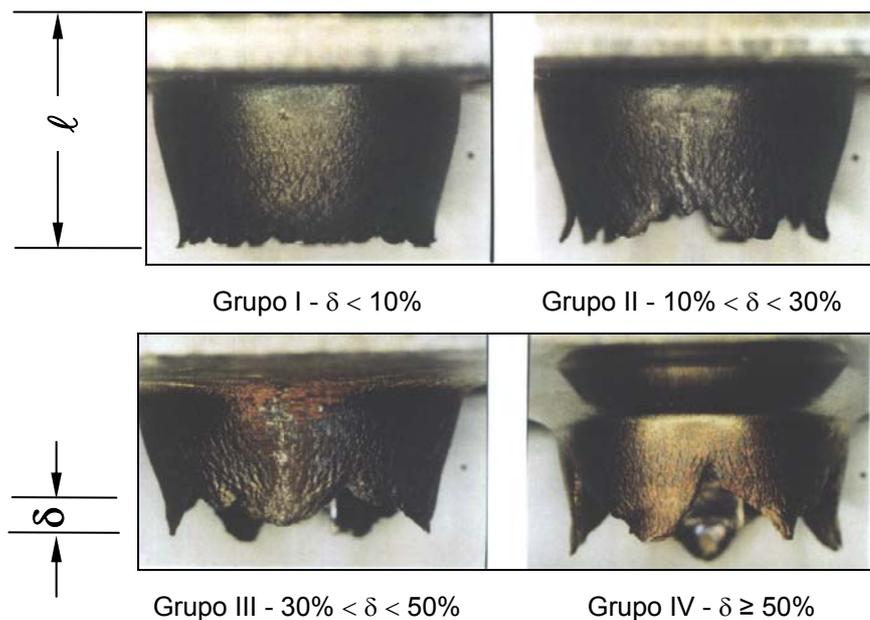


Figura 17 – Grupos de qualidade das rebarbas inferiores [1,24].

A qualidade das rebarbas é influenciada basicamente pelas condições de trabalho e pela relação entre o diâmetro da ferramenta e a espessura da chapa. Como grandeza de maior influência se destaca a rotação da ferramenta, que produz a maior parcela de calor necessário ao escoamento do material e à conformação da bucha. A velocidade de avanço, quando constante, tem uma influência secundária. Em aço de baixo carbono as buchas de melhor qualidade são obtidas com baixas rotações [1,12].

c) Alterações microestruturais

Na furação por escoamento o material é aquecido e deformado gradativamente, à medida que o processo se desenvolve. O material é submetido simultaneamente a diferentes taxas de deformação e temperaturas, cuja zona de influência se estende até certa região adjacente ao furo [1,25,36]. Devido à presença destes gradientes de deformação e temperatura na zona termomecanicamente afetada (ZTA) da bucha escoada, podem ocorrer de forma simultânea diferentes mudanças microestruturais, como transformações de fases, recuperação, recristalização e crescimento de grão [1,7,25,38-41].

Duarte Filho [1], estudando as zonas termomecanicamente afetadas (ZTA) de buchas escoadas de aço SAE 1012 em diversas condições de trabalho, verificou que nas microestruturas das amostras com velocidade de avanço constante, a

recristalização e o refino de grão ficaram restritos a região superior da bucha escoada (figura 18), conseqüência da alta deformação imposta e da temperatura localmente menor. Na região inferior verificou-se a presença de estruturas aciculares, como a ferrita de Widmanstätten, possibilitada pela ação conjunta da temperatura, do tempo e da velocidade de resfriamento (figura 19) [1].

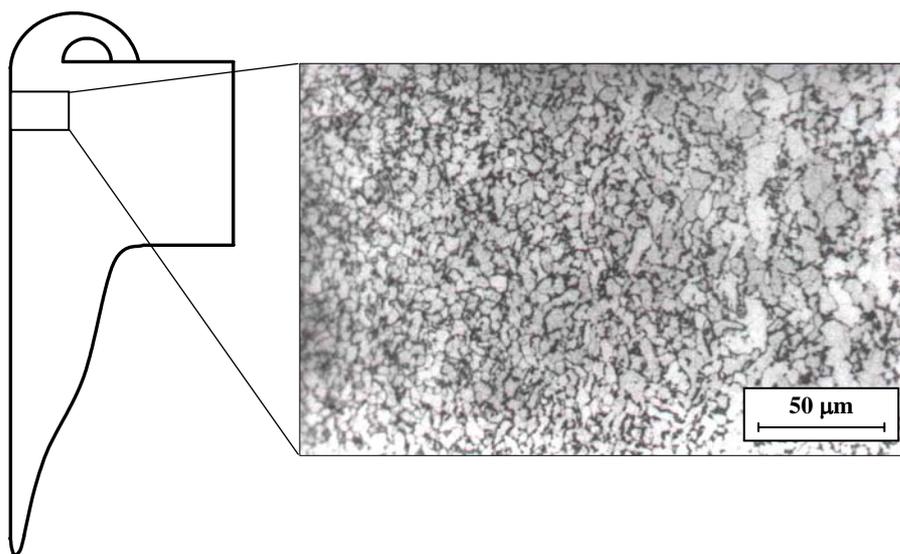


Figura 18 – Micrografia da região superior da bucha escoada apresentando estrutura com recristalização e refino de grão [1].

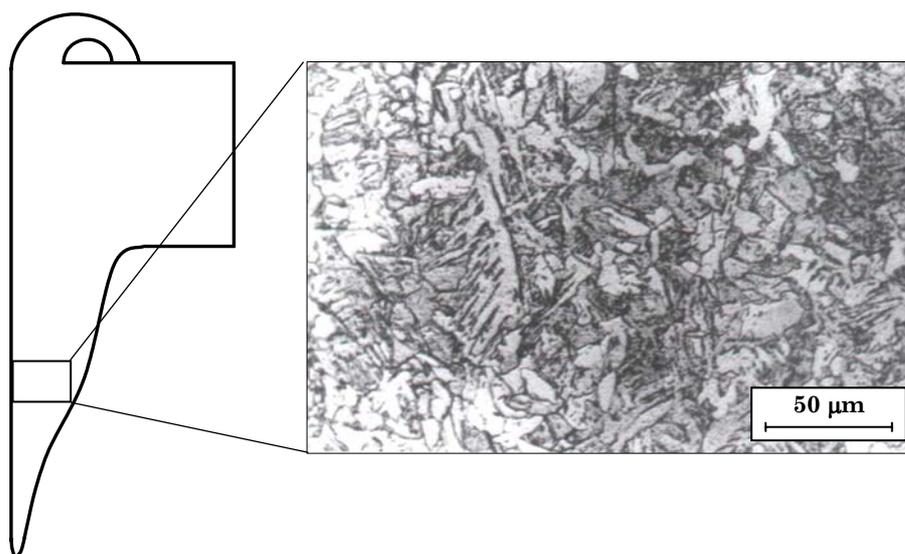


Figura 19 – Micrografia da região inferior (rebarba inferior) da bucha escoada apresentando estrutura de grãos aciculares [1].

As microestruturas das buchas produzidas com velocidade de avanço variável apresentaram recristalização e refino de grão em toda a bucha. Na região superior da bucha (figura 20) ocorreu maior refino de grão do que nas amostras com velocidade de avanço constante. Na região inferior (mais deformada) ocorreu intensa recristalização, ocasionando grãos equiaxiais refinados (figura 21) [1].

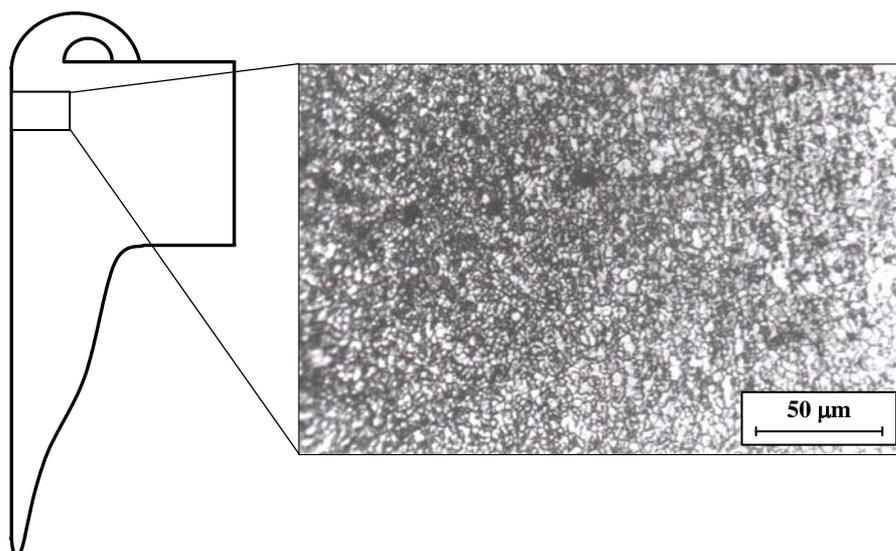


Figura 20 – Micrografia da região superior da bucha escoada apresentando estrutura com intensa recristalização e refinamento [1].

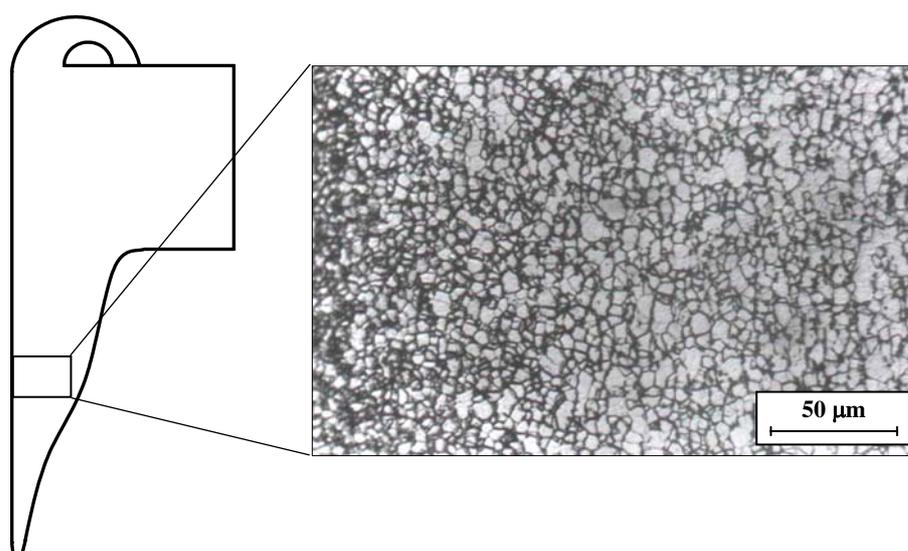


Figura 21 – Micrografia da região inferior (rebarba inferior) da bucha escoada apresentando estrutura de grãos equiaxiais refinados [1].

Outros pesquisadores [22,34,38-42] também fazem referência a alterações microestruturais no material quando da análise da zona termomecanicamente afetada (ZTA) de buchas escoadas em aço baixo carbono (DIN St 37 - ABNT 1020), aço inoxidável austenítico (DIN X5CrMi1810) e liga de alumínio (DIN AlMgSi0,5), empregando condições de trabalho constantes e variáveis em processo.

Estas alterações microestruturais ocasionadas por variações no processo de furação por escoamento irão afetar as propriedades mecânicas das buchas escoadas e conseqüentemente das buchas roscadas.

A figura 22 mostra a variação da microdureza em função da distância à borda do furo da bucha para um aço baixo carbono DIN St 37 (ABNT 1020). Na região mais deformada (borda do furo da bucha) verifica-se um acentuado aumento da dureza, em torno de 30%, provavelmente em função de refino de grão decorrente de recristalização. Próximo à borda do furo da bucha, em direção ao material-base, ocorre uma diminuição da resistência mecânica, como resultado de possível processo de recuperação [1,34].

Um perfil idêntico ao apresentado pela figura 22 foi encontrado por Duarte Filho [1] em seus ensaios em aço SAE 1012, obtendo valores de microdureza até 40% maiores em regiões próximas à borda do furo da bucha em relação ao material-base, dependendo das condições de trabalho empregadas.

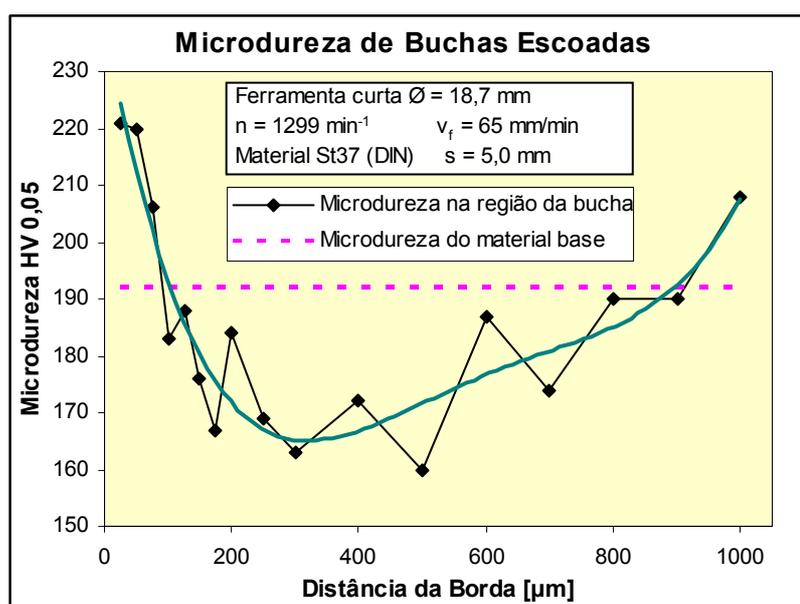


Figura 22 – Medições de microdureza na região da borda da bucha [34].

2.2 Rosqueamento por Conformação

Para que a bucha escoada possa ser utilizada como elemento de união entre peças é necessária a produção de rosca interna. A rosca pode ser produzida empregando-se machos convencionais (de corte) ou machos de conformação. Neste caso, o rosqueamento por conformação é particularmente vantajoso devido à não ocorrência de remoção de material da parede da bucha, o que diminuiria sensivelmente a resistência à tração da bucha roscada [1,6,22].

2.2.1 Cinemática do processo de rosqueamento por conformação

O rosqueamento por conformação é um processo de fabricação de roscas internas em materiais metálicos. A aplicação desse tipo de processo é bastante ampla e abrange materiais como aços carbono, aços-baixa liga, aços-ferramentas, alumínio e cobre [8,11,43-45]. Tem sido pesquisada a sua aplicação em ferro fundido nodular [43,45-47].

Em comparação com os processos convencionais de rosqueamento por retirada de material, o rosqueamento por conformação apresenta as seguintes vantagens [1,8,22,43-45]:

- **Sem cavacos:** No rosqueamento por conformação não são produzidos cavacos. Principalmente vantajoso em elementos de parede fina ou quando a retirada de material ocasiona uma redução adicional da resistência da rosca.
- **Sem trabalho posterior:** A ferramenta se auto-guia durante a conformação da rosca. Deste modo não é necessário um trabalho posterior.
- **Elevada velocidade de conformação:** Como não há necessidade de transportar cavacos, o processo se desenvolve mais rapidamente (até 300%) em comparação com os machos de corte. A maior velocidade de conformação causa um aumento da temperatura na região de trabalho e, conseqüentemente, uma redução da tensão de escoamento do material.
- **Elevada estabilidade dimensional:** A rosca apresenta elevada estabilidade dimensional, a qual é limitada somente pelo desgaste dos filetes do macho.
- **Elevada qualidade superficial:** Devido à elevada pressão superficial gerada durante a conformação são produzidos flancos de rosca muito planos,

havendo, entretanto, a necessidade de uma lubrificação eficiente (óleo, emulsão ou minimização da quantidade de lubrificante). A superfície plana dos flancos das roscas favorece a montagem e o comportamento das uniões parafusadas (redução do atrito e do momento torçor).

- **Maior resistência da rosca:** Durante o rosqueamento por conformação há encruamento, sendo que as fibras do material são apenas dobradas e não cortadas apresentando, deste modo, maior resistência em comparação com processos de rosqueamento com retirada de material.
- **Elevada estabilidade da ferramenta:** A estabilidade da ferramenta de rosqueamento por conformação é evidentemente maior quando comparada com os rosqueamentos convencionais, devido à não-existência de cavacos.
- **Maior tempo de vida:** Sob condições apropriadas (boa conformabilidade do material com baixa resistência) a vida de um macho de conformação pode ser multiplicada por 10 quando comparada à vida da ferramenta de rosqueamento convencional.
- **Elevada segurança do processo:** Empregando-se dados tecnológicos apropriados e furo prévio correto o perigo de ruptura da ferramenta no rosqueamento por conformação é considerado muito pequeno. Deste modo o processo torna-se apropriado para uma produção automatizada.

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 23. As superfícies produzidas nos filetes são análogas àquelas produzidas por processos de forjamento, laminação e trefilação externa de roscas [1,2,44,45].

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 [2,42-45].



Figura 23 - Formação dos filetes no rosqueamento por conformação [1,2,44,46].

2.2.2 Tecnologia do processo de rosqueamento por conformação

Os principais fatores influentes no processo são apresentados na figura 24. Eles podem ser divididos em grandezas de entrada, grandezas de processo e resultados de trabalho.

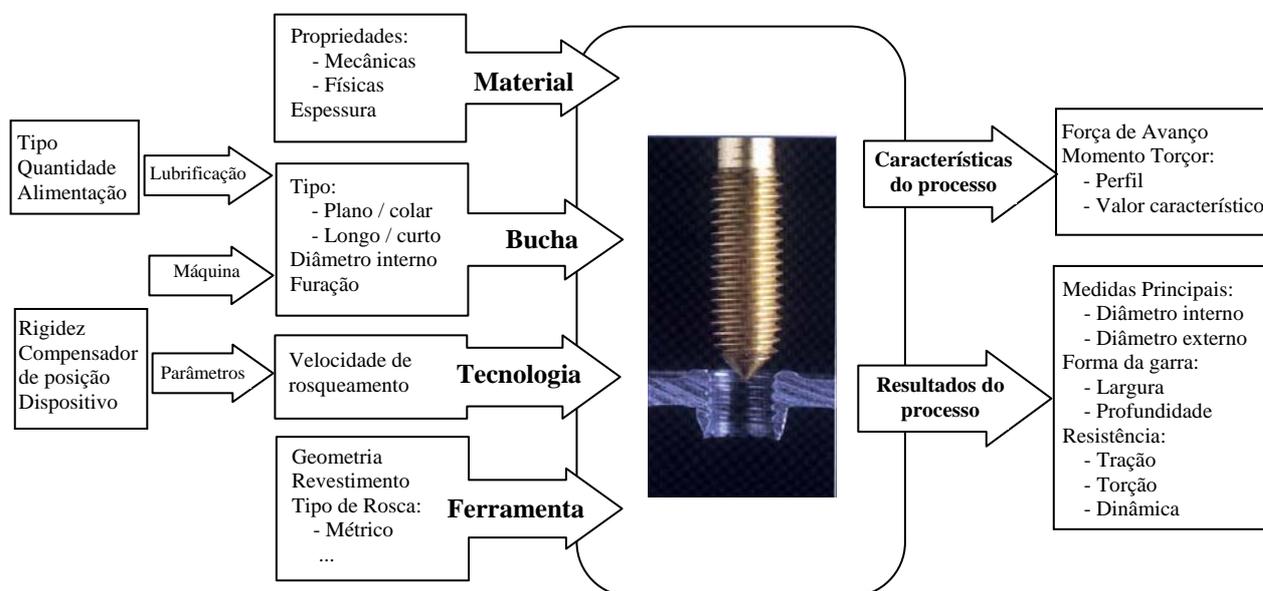


Figura 24 – Resumo esquemático do processo de rosqueamento por conformação [3,11,22,43,45].

2.2.3 A ferramenta para rosqueamento por conformação

A geometria das ferramentas de rosqueamento por conformação permite suportar os altos momentos torçores requeridos para a fabricação das roscas, além de serem menos sensíveis a variações de dimensão e qualidade do furo inicial [1,43,44]. A seção de um macho de conformação é poligonal, conforme figura 25, e composta normalmente de três, quatro ou mais cantos [6]. Normalmente, podem ser utilizadas nas mesmas máquinas-ferramentas empregadas no rosqueamento por usinagem e atualmente são produzidas em aço-rápido de alta resistência, podendo ser revestidas com TiN e Ti (CN) pelo processo PVD (figura 26) [11,43,45,47].

O macho de conformação 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 [11,42-44,46].

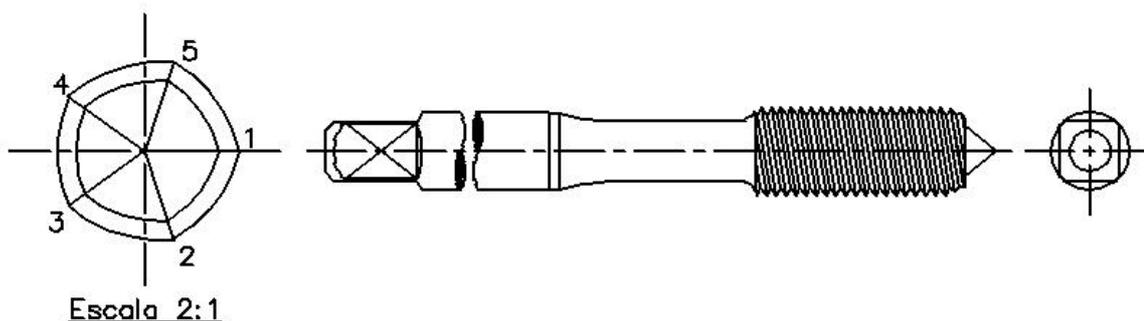


Figura 25 - Macho de conformação com 5 cantos [1].

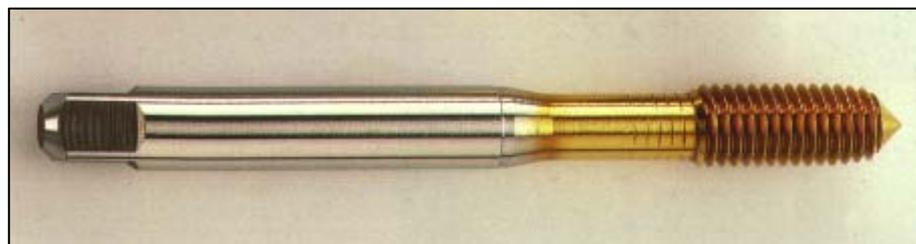
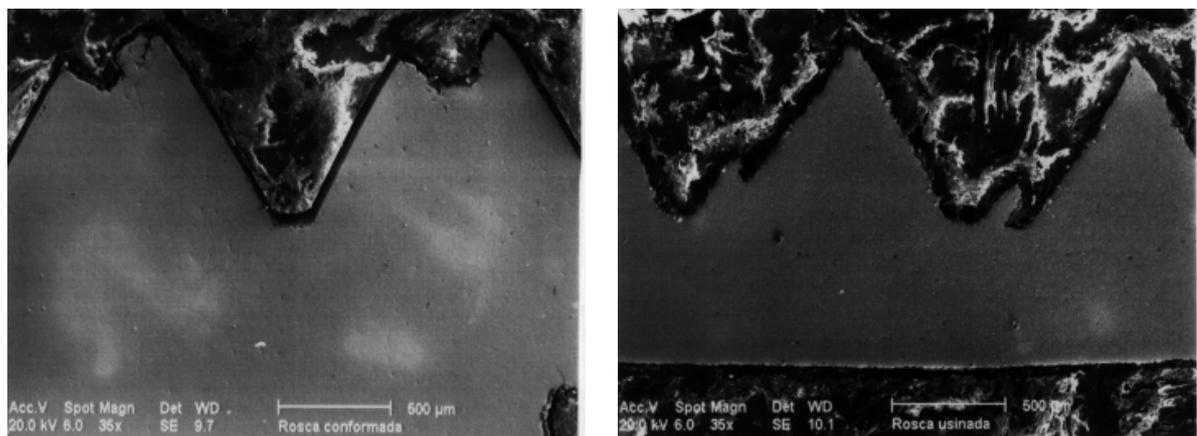


Figura 26 - Macho de conformação de aço-rápido revestido com TiN [1].

2.2.4 Formação do filete de rosca

Uma das particularidades do processo de rosqueamento por conformação é que o “fibramento” mecânico do material da peça não é interrompido. Esta característica, em conjunto com o encruamento superficial localizado, promove um aumento na resistência das roscas. Já no rosqueamento por usinagem as “fibras” do material são cortadas pela ação do macho e apresentam microtrincas na superfície dos filetes, os quais causam uma redução na resistência mecânica das roscas (figura 26) [11,43,45,46]. Em geral, as roscas produzidas pelo rosqueamento por conformação são de 20 a 50% mais resistentes que as roscas produzidas por usinagem [22,43-45].



(a) Rosca conformada

(b) Rosca usinada

Figura 27 – Macrografia de filetes de rosca formados por rosqueamento por conformação e por usinagem [11].

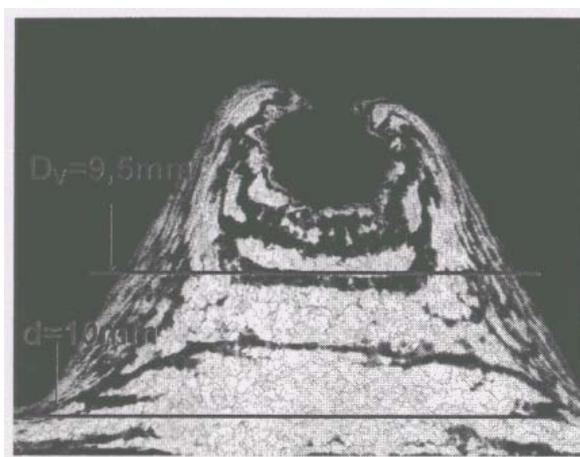


Figura 28 – Aparência da “garra” na crista do filete formado por rosqueamento por conformação [45].

Outra característica do rosqueamento por conformação é a formação na crista do filete de uma pequena cavidade denominada de “garra”, proveniente do encontro do material deslocado de dois flancos adjacentes (figura 28) [11,43,45].

2.2.5 Resultados de trabalho

O gráfico da figura 29 apresenta alguns resultados quanto à classe de resistência alcançada por roscas conformadas em buchas escoadas em aço St37 (ABNT 1020) [11,43,45].

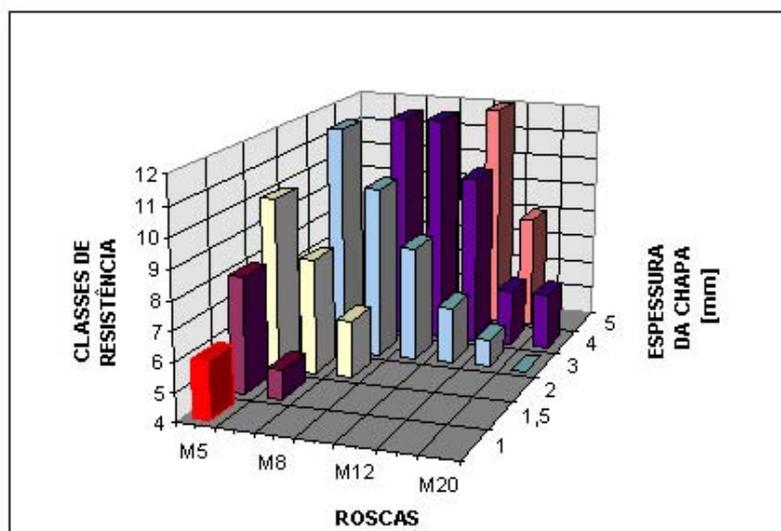


Figura 29 – Classes de resistência atingidas por buchas escoadas confeccionadas em chapas finas de aço St37 (ABNT 1020) [11,43,45].

Buchas roscadas M8, confeccionadas em chapas de aço SAE 1012 com 3,0 mm de espessura, alcançaram valores de resistência à tração máxima média de 41 kN, quando produzidas com parâmetros de trabalho constante em processo e, para parâmetros de trabalho variáveis em processo atingiram 42 kN [1]. Estes valores, segundo a norma DIN 267 - parte 4 [48], enquadram as buchas nas classes de resistência 8 e 10, respectivamente. O aumento na classe de resistência para a última foi devido à melhor geometria da bucha e a microestrutura mais refinada [1].

2.3 Encruamento, Recuperação e Recristalização

O encruamento, a recuperação e a recristalização são alterações

metalúrgicas que ocorrem nos materiais quando estes são submetidos a processos que incutem grandes deformações e temperaturas elevadas em regiões específicas ou de forma generalizada. Dependendo da intensidade das alterações metalúrgicas impostas, elas podem influenciar de sobremaneira as características mecânicas do material, ocorrendo, por exemplo, aumento no limite de escoamento e na dureza.

2.3.1 Encruamento

Quando os metais são submetidos a deformação plástica a frio ocorre a geração de energia, sendo que a sua maior parte é dissipada na forma de calor. Uma fração da energia de deformação (aproximadamente 10%) é armazenada internamente e está associada aos defeitos cristalinos gerados [49-53], os quais afetam as propriedades do material, particularmente as associadas à deformação plástica. Esses defeitos podem ser classificados em pontuais (lacunas, defeitos intersticiais, defeitos substitucionais), lineares (discordâncias) e planares (contornos de grãos, contornos de subgrãos, contornos de macla, falhas de empilhamento) [49,54-56].

A quantidade de energia armazenada varia em função da severidade da deformação, da diminuição da temperatura de deformação e da adição de elementos de liga [49,51,52]. A maior parte dessa energia está, contudo, relacionada à geração e a interação de discordâncias: o número destas se eleva consideravelmente com a elevação da intensidade de deformação plástica, ou seja, aumenta a densidade de discordâncias. Densidades de discordâncias tão baixas quanto 10^3 mm^{-2} são encontradas em cristais metálicos cuidadosamente solidificados. No caso de metais altamente deformados, a densidade pode ser tão elevada quanto 10^9 a 10^{12} mm^{-2} [49, 54-57].

A deformação plástica ocorre por movimentação de discordâncias (e multiplicação de discordâncias). O encruamento aparece como consequência do impedimento da movimentação das discordâncias durante a deformação plástica, de modo que uma tensão mais elevada deva ser imposta ao material para que a deformação prossiga [54,55,57,58].

Existem vários obstáculos à livre movimentação de discordâncias, sendo os mais importantes [54,58]:

- Outras discordâncias;

- Contornos de grão e de subgrão;
- Átomos de soluto;
- Partículas de segunda fase e
- Filmes superficiais.

Como resultado do encruamento algumas propriedades mecânicas são alteradas [49,50,53,54]. Verifica-se que um metal mais encruado apresenta maiores limites de escoamento e de resistência, maior dureza e menor alongamento e estrição, ou seja, à medida que a resistência se eleva pelo encruamento a ductilidade decresce (figura 30) [49,54,55].

Além disso, outras propriedades como a condutividade elétrica e a resistência a corrosão podem ser modificadas como consequência da deformação plástica [49,53-55].

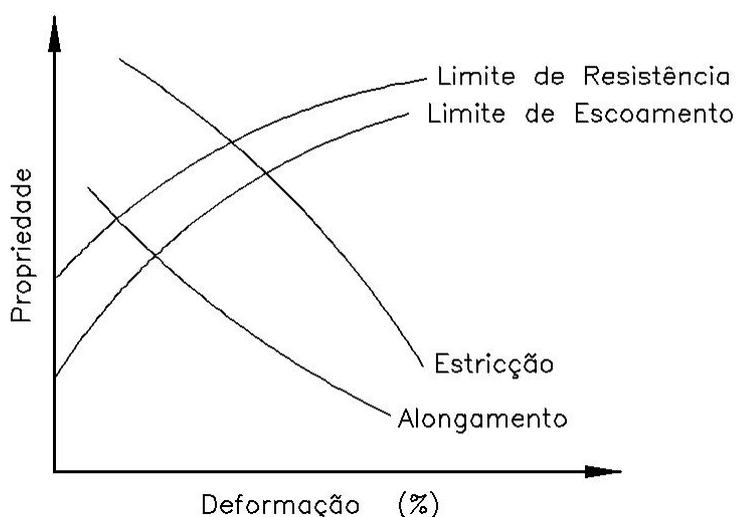


Figura 30 – Variação esquemática das propriedades mecânicas com o aumento da deformação plástica [49].

2.3.2 Recuperação e recristalização

A figura 31 ilustra a liberação de energia no recozimento isotérmico de um metal encruado. Podem ser observados dois picos de liberação de energia: o primeiro relativamente pequeno e em temperaturas mais baixas e o segundo em temperaturas mais altas (na figura 31 a temperatura é constante e, portanto, não se observam picos em temperaturas mais baixas). Eles estão relacionados aos

processos de recuperação e de recristalização, respectivamente [52,53,58]. Após a recristalização, para tempos mais longos de recozimento ocorre o crescimento de grão [49,50,59]. As mudanças microestruturais e de propriedades mecânicas durante o recozimento podem ser observadas esquematicamente na figura 32.

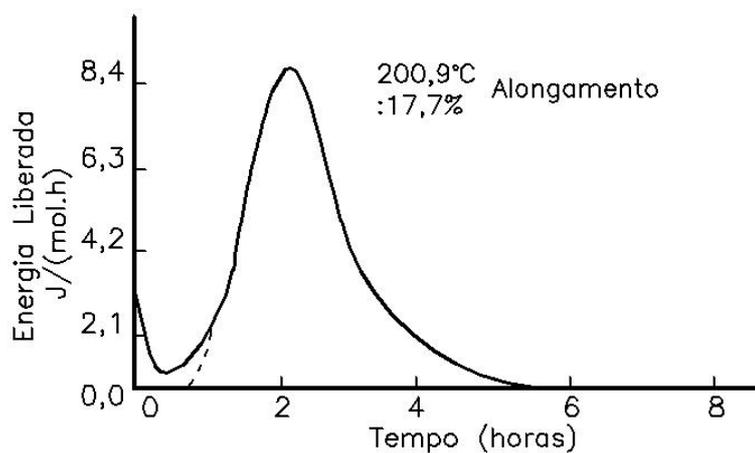


Figura 31 – Curva de recozimento isotérmico [52].

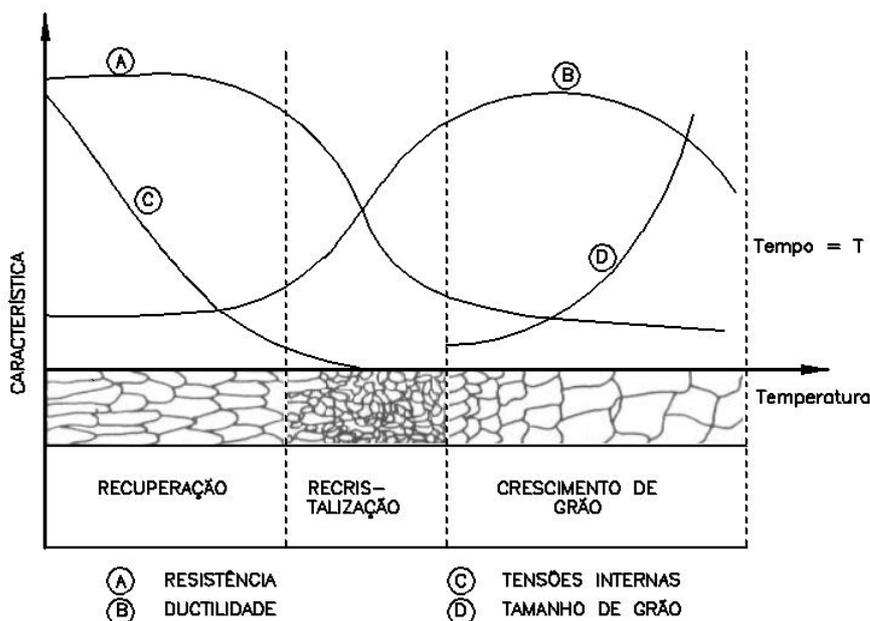


Figura 32 – Modificações microestruturais e das propriedades mecânicas na recuperação, recristalização e crescimento de grão [49].

a) Recuperação

É o primeiro estágio do processo de restauração das propriedades mecânicas

modificadas pelo trabalho a frio [49,50,59,60]. Quando metais encruados são recozidos em temperaturas relativamente baixas ($0,2 T_f$, onde T_f é a temperatura de fusão absoluta) ocorre a eliminação de defeitos puntiformes pela migração para contornos de grão e discordância [51,52,59,60]. Temperaturas maiores, entre $0,2$ e $0,3 T_f$, promovem a eliminação de discordâncias de sinais opostos e o rearranjo de discordâncias, formando subcontornos de grão (contornos de pequeno ângulo). As discordâncias de mesmo sinal movimentam-se nos planos de escorregamento e sofrem escalagem, agrupando-se em subcontornos, formando sub-grãos e minimizando os campos de tensão elástica [51-53]. Este processo de rearranjo de discordâncias é denominado poligonização [49,51-53,60], representado esquematicamente na figura 33.

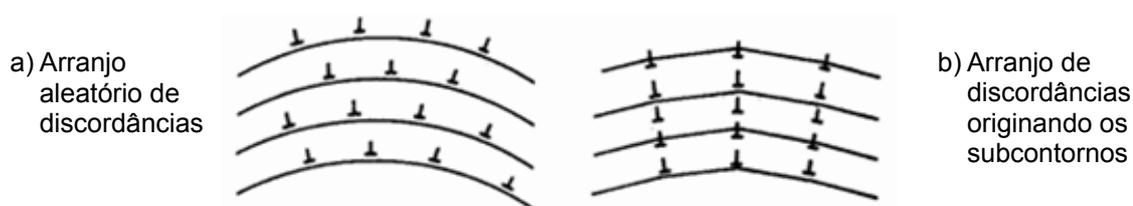


Figura 33 – Esquema do processo de poligonização [51].

b) Recristalização

A recristalização promove principalmente o retorno das propriedades mecânicas do metal deformado a frio àquelas do estado recozido. As propriedades mecânicas como dureza, limite de escoamento e de resistência à tração que pouco se alteram durante o processo de recuperação, na recristalização se modificam drasticamente em uma pequena faixa de temperatura [53,61].

O fenômeno de recristalização é um processo de nucleação e crescimento, onde núcleos “não-deformados” começam a crescer a partir do metal deformado [52,53,59,61], e portanto, tem-se um período de incubação. A recristalização se inicia lentamente e gradualmente alcança uma taxa máxima e, próximo da completa recristalização, a taxa de transformação decresce novamente [52,53,61].

A deformação a frio afeta a cinética de recristalização, conforme ilustrado na figura 34 [52,53]. Menores deformações geram, durante a recristalização, menos núcleos por unidade de volume e o tempo de incubação para formação destes

núcleos é maior. O menor número de núcleos leva a um tamanho de grão recristalizado mais grosseiro [51,53].

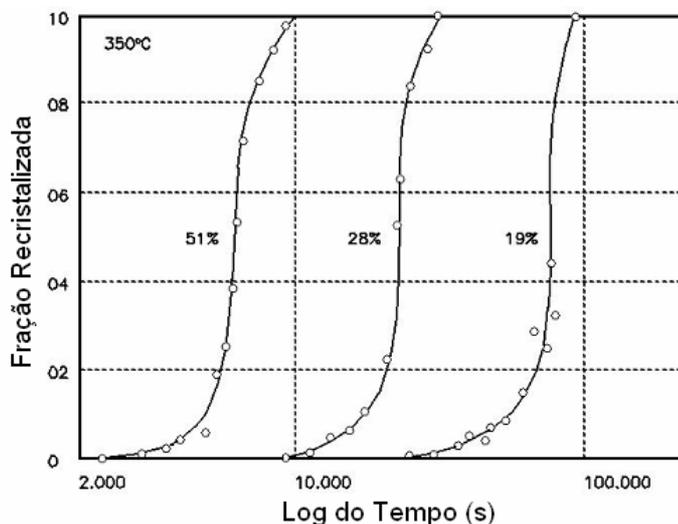


Figura 34 – Efeito da deformação na cinética de recristalização do alumínio a 350°C [53].

A figura 35 mostra o efeito da temperatura de recozimento no tempo de recristalização. Quanto maior a temperatura, menor será o tempo necessário para se completar a recristalização. Conforme a temperatura é elevada, o pico de energia liberada se move para tempos mais curtos e se torna mais agudo, embora a quantidade total de energia livre não se altere. O aumento da temperatura também reduz a deformação crítica para que ocorra recristalização [52,53,59,61].

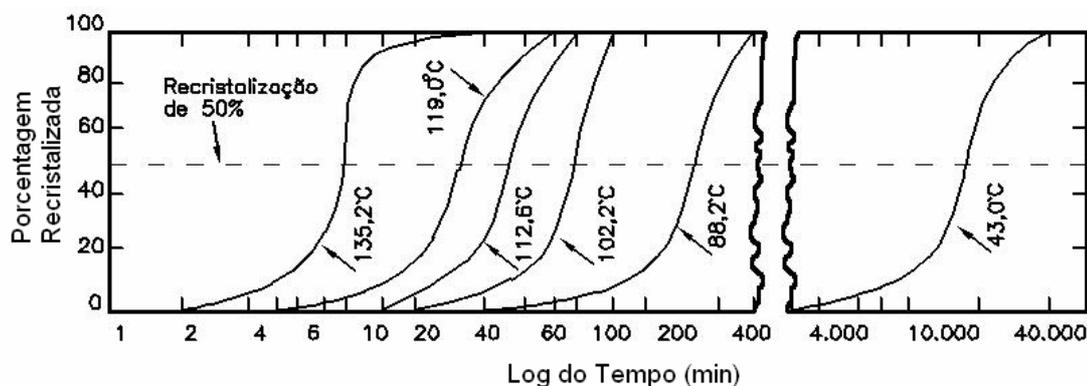


Figura 35 – Curva de transformação isotérmica (recristalização) para cobre puro laminado a frio, 98% [52,59].

Em geral, quanto mais puro for um metal, menor é a temperatura de início de recristalização e maior é a sua velocidade. Pequenas porcentagens de elementos em solução sólida podem elevar a temperatura de recristalização em algumas centenas de graus, devido à tendência dos átomos de impurezas segregarem para as interfaces, como contornos de grão e subgrãos. Quando estes átomos migram para um contorno, tanto a energia elástica como a energia do contorno diminui, diminuindo a movimentação dos contornos de grão e subgrãos na recristalização [52,53].

A recristalização ocorre mais facilmente em metais com grãos finos porque aumenta a área de contorno de grão por unidade de volume. Este efeito aumenta o número de locais preferenciais para a nucleação e, assim, quanto menor for o tamanho dos grãos antes do encruamento, maior será a velocidade de nucleação e menor o tamanho do grão recristalizado para um dado grau de deformação [52,53,59].

b1) Nucleação na recristalização

Os mecanismos de nucleação de recristalização (rearranjo de discordâncias de modo a formar uma região livre de defeitos associada a um contorno de alto ângulo com alta mobilidade) podem ser [51,62,63]:

- Migração de contornos de alto ângulo pré-existente induzida por deformação;
- Migração de contornos de baixo ângulo (subcontornos);
- Nucleação por coalescimento de subgrãos.

Migração de contorno de alto ângulo pré-existente induzida por deformação

Este mecanismo envolve a migração de um contorno de grão pré-existente para o interior de um grão mais deformado [51,53,63], conforme a figura 36. Estudos mostraram que o mecanismo é dominante para deformações de até 40% [51,62], e é freqüentemente associado ao início da recristalização durante a deformação a quente [62].

A condição para que o processo possa ocorrer é o balanço energético favorável entre a redução da energia armazenada devido à eliminação de defeitos e o aumento da superfície total do contorno de grão [51].

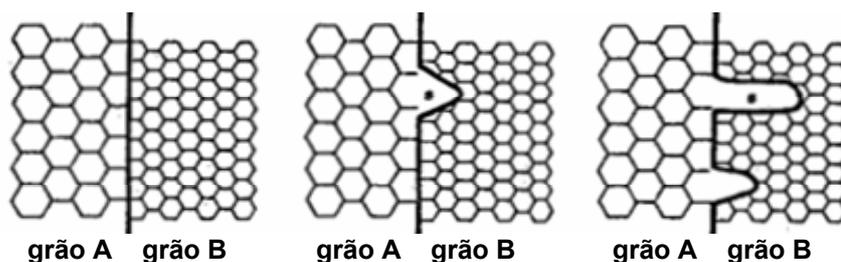


Figura 36 – Representação esquemática da nucleação por migração de contornos induzida por deformação [51].

Migração de contornos de baixo ângulo (subcontornos)

O modelo é baseado no fato de que alguns subgrãos formados durante a poligonização são capazes de crescer sobre seus vizinhos por migração de subcontornos ativada termicamente. Desta forma, ocorrerá uma diminuição da energia armazenada pela eliminação e rearranjo de defeitos da microestrutura. O subcontorno em migração absorve discordâncias, aumentando sua diferença de orientação, sua energia e sua mobilidade até que se transforma em um contorno de alto ângulo, caracterizando a nucleação [51,53,63].

O mecanismo está associado a altas deformações, a grandes variações no tamanho de subgrão, a temperaturas de recozimento relativamente altas e a metais de baixa energia de falha de empilhamento (EDE) [51,62].

Nucleação por coalescimento de subgrãos

O mecanismo consiste em coalescimento de dois subgrãos vizinhos, o que equivale a uma rotação, tornando seus reticulados cristalinos coincidentes [51-53], como mostrado na figura 37.

O coalescimento é um mecanismo que promove crescimento de subgrãos, eliminação de subcontornos (diminuindo a energia armazenada) e alteração das diferenças de orientação entre o grupo que sofreu coalescimento e os subgrãos vizinhos. O aumento dessas diferenças de orientação leva ao aparecimento de um contorno de alto ângulo capaz de migrar com alta velocidade, constituindo um núcleo de recristalização [51,53].

O mecanismo de coalescimento de subgrãos parece estar associado a bandas de transição, a grandes variações de orientação de subgrão, deformações moderadas, a regiões vizinhas a contornos de grão, a temperaturas de recozimento

relativamente baixas e a metais com alta energia de falha de empilhamento (EDE) [51,62].

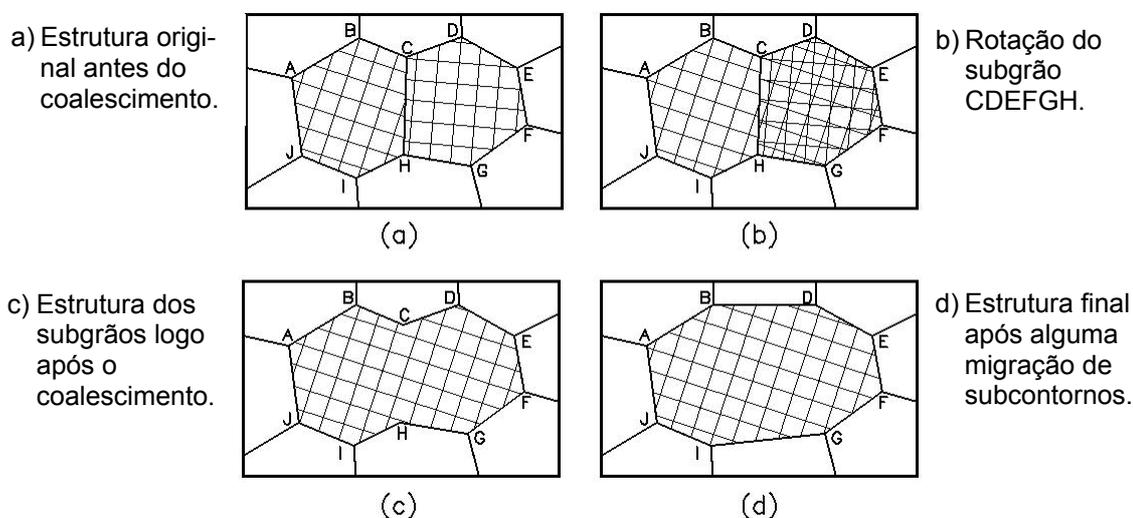


Figura 37 – Coalescimento de dois subgrãos por “rotação” de um deles [51].

A tabela 1, abaixo, apresenta de modo resumido as condições para a ocorrência dos mecanismos de início de recristalização.

Tabela 1 - Ocorrência dos mecanismos de início de recristalização [62].

Migração de contornos induzida por deformação	Migração de subcontornos	Coalescimento de subgrãos
<ul style="list-style-type: none"> - Baixas deformações (até ~40%); - Deformação a quente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Altas deformações; - Altas temperaturas; - Tamanhos de subgrão heterogêneos; - Metais de baixa EDE. 	<ul style="list-style-type: none"> - Deformações moderadas; - Temperaturas relativamente baixas; - Grandes diferenças de orientação; - Bandas de transição; - Metais de alta EDE.

b2) Crescimento das regiões recristalizadas

O principal potencial termodinâmico para que a recristalização ocorra é a energia armazenada na deformação. Quando há a formação de uma região livre de defeitos circundada por um contorno de alto ângulo, a recristalização prossegue por crescimento desse “núcleo” sobre a matriz encruada.

Em condições isotérmicas, a recristalização primária geralmente apresenta um tempo de incubação, associado ao processo de formação do “núcleo” [51,52, 62,64]. A ausência do período de incubação geralmente está associada à nucleação do tipo migração de contorno pré-existente e com metais de alta pureza, não havendo, neste caso, a necessidade de tempo para a formação de um contorno de alta mobilidade. O crescimento das regiões recristalizadas pela migração de contornos de alto ângulo continua até que os grãos recristalizados se toquem mutuamente (figura 38). A recristalização primária termina quando as frentes de reação se encontram [51,62,64].

Após a recristalização primária pode ocorrer o crescimento dos grãos recristalizados, que conduz normalmente a um aumento no seu tamanho médio.

Assim como a recristalização primária, o crescimento de grão é termicamente ativado [51]. A energia de ativação para o crescimento de grão é a redução na energia superficial dos contornos de grão devido à redução da área do contorno por unidade de volume [52,53,60,61].

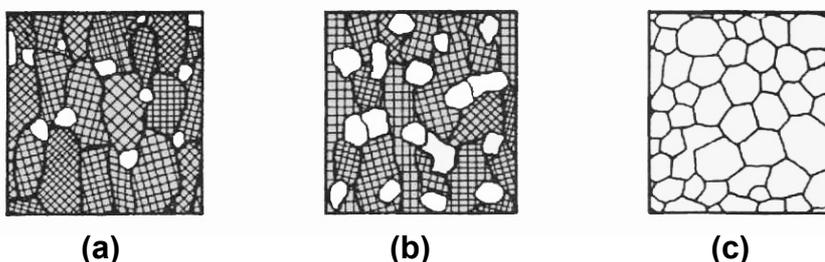


Figura 38 – Representação esquemática da recristalização primária.
(a) Início da recristalização. (b) 50% de recristalização.
(c) Recristalização completa [51,64].

A forma dos grãos é controlada por um compromisso entre o equilíbrio de tensões superficiais e os requisitos geométricos necessários para o total preenchimento do espaço. Em análise bidimensional, a situação de equilíbrio consiste em grãos de seis lados formando ângulos de 120° . Grãos com mais de seis lados possuem lados côncavos e tendem a crescer sobre os grãos com menos de seis lados, como mostrado esquematicamente na figura 39 [51-53,61].

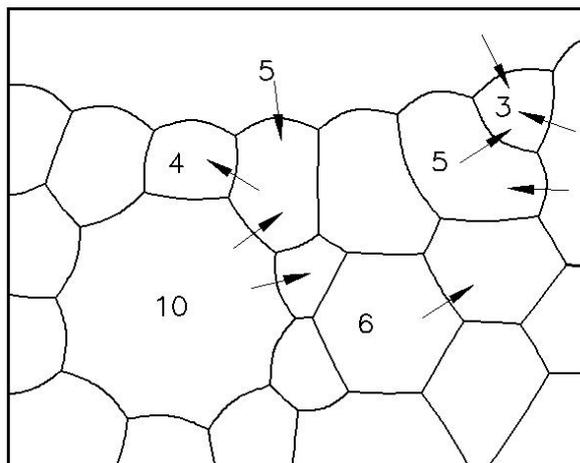


Figura 39 – Estrutura de grãos mostrando a influência do número de lados dos contornos. Os grãos com 6 lados estão em equilíbrio [51,61].

2.3.3 Processos de restauração durante a deformação

Nos processos de deformação a quente pode ocorrer simultaneamente o encruamento, recuperação e recristalização. Estes processos, quando ocorrem durante a deformação, são denominados de dinâmicos e somente podem ser “observados” indiretamente por curvas de escoamento obtidas em ensaios mecânicos a quente como tração, compressão e torção [5,51,65,66].

a) Recuperação dinâmica

À medida que o metal é deformado a quente, o número de defeitos cristalinos aumenta. Devido à ativação térmica, as discordâncias geradas se rearranjam para uma estrutura de subgrãos [51,52,66-68].

A temperatura elevada permite, em certo instante, que a quantidade de defeitos gerados seja compensada pela quantidade de defeitos eliminados. Nesse ponto é atingido um estado estacionário, ou seja, a quantidade de defeitos permanece constante [51,68]. Na curva tensão-deformação esse efeito aparece como uma estabilização da tensão à medida que o material é deformado [51,66].

Durante a recuperação dinâmica não ocorre migração de contornos de alto ângulo; os grãos vão se alongando de acordo com a mudança de forma do material, enquanto os subgrãos mantêm estrutura equiaxial [51,66].

No interior dos subgrãos existem discordâncias que são geradas e eliminadas

no processo de deformação. A quantidade de discordâncias, o espaçamento médio entre elas e a diferença de orientação entre os subgrãos não variam significativamente no estado estacionário [51,66]. As dimensões dos subgrãos, as diferenças de orientação e os subcontornos dependem principalmente da natureza do metal, da temperatura e da taxa de deformação [51,52,66].

A diferença básica entre as recuperações dinâmica e estática é que na recuperação estática o movimento das discordâncias para as paredes das células resulta da interação entre as tensões das próprias discordâncias. Na recuperação dinâmica a tensão aplicada externamente é adicionada às tensões que agem entre as discordâncias. Assim os efeitos da recuperação dinâmica podem ser observados em baixas temperaturas quando as tensões aplicadas são elevadas [52].

b) Recristalização dinâmica

A ocorrência da recristalização dinâmica está associada à geração de um grande número de defeitos cristalinos durante a deformação a quente. Esses defeitos não podem ser eliminados apenas por recuperação dinâmica, seja devido às altas taxas de deformação ou devido à baixa energia de falha de empilhamento do material, aumentando o potencial termodinâmico para a recristalização [51,66,69]. Quando esse estágio é atingido, diz-se que ocorre um ciclo de recristalização. A figura 40 mostra comparativamente a ocorrência de encruamento, recuperação dinâmica e recristalização dinâmica [51,66].

Para altas taxas de deformação, a curva tensão-deformação apresenta um pico de tensão correspondente à deformação ϵ_p seguido de uma estabilização da tensão à medida que o material deforma, e a recristalização é denominada de recristalização dinâmica “contínua”. Para baixos valores de velocidade de deformação, a restauração se dá em ciclos de deformação-recristalização dinâmica, como mostrado na figura 41. Neste último caso, a curva apresenta vários picos de tensão e o fenômeno é chamado de recristalização dinâmica “periódica” [51,66,67,69,70].

Existe uma deformação mínima para o início da recristalização dinâmica definida como deformação crítica, ϵ_c . Para aços de baixo carbono deformados a quente, o valor da deformação crítica é $0,8x\epsilon_p$ [51,66]. Em geral ϵ_c aumenta com o aumento da velocidade de deformação e decresce com a temperatura [5].

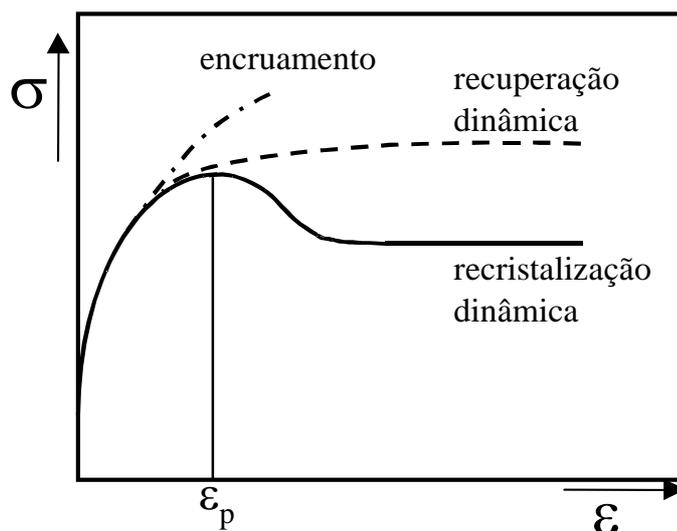


Figura 40 – Curvas esquemáticas tensão-deformação mostrando comparativamente a ocorrência de encruamento, recuperação dinâmica e recristalização dinâmica [51,66].

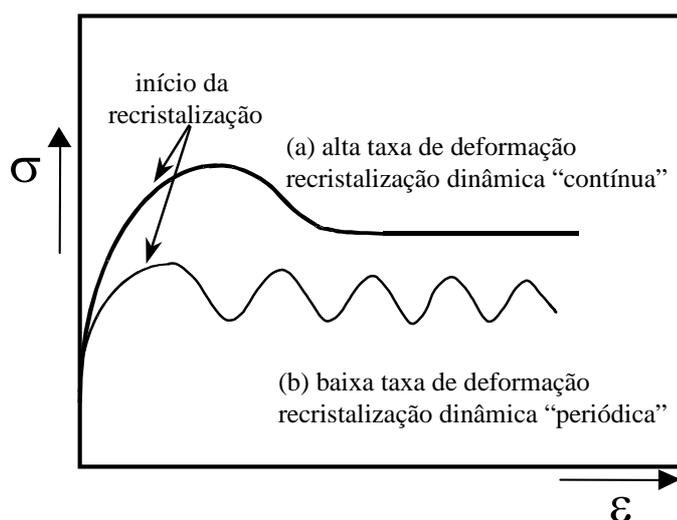


Figura 41 – Recristalização dinâmica durante a deformação a quente. (a) Alta taxa de deformação. (b) Baixa taxa de deformação [51,66,70].

Na maioria dos processos de deformação a quente, a nucleação da recristalização dinâmica ocorre preferencialmente nos contornos de grão. Há formação de colares sucessivos, que consistem em nucleação dos novos grãos em etapas, que avançam seqüencialmente para o interior do grão original acarretando considerável refino de grão [51,66,69-73]. A figura 42 mostra o mecanismo esquematicamente.

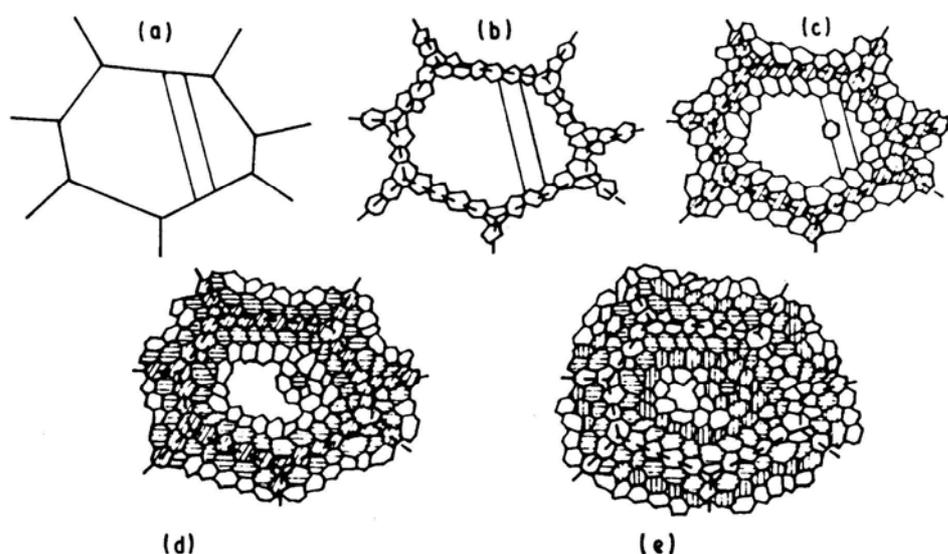


Figura 42 – Mecanismo de nucleação por formação de colares sucessivos. (a) Grão original. (b) Primeira etapa ocorrendo junto aos contornos de grão. (c) Segunda etapa ocorrendo junto aos grãos recristalizados dinamicamente. (d) Terceira etapa, idem a segunda. (e) Quarta etapa, estado estacionário [51,66].

c) Recristalização metadinâmica

Uma vez iniciada a recristalização dinâmica durante a deformação, o crescimento dessas regiões recristalizadas dinamicamente pode continuar após o término da deformação. Esse processo é chamado de recristalização metadinâmica e difere dos outros mecanismos de recristalização por não apresentar período de incubação, já que os núcleos foram formados dinamicamente [51,66,68].

A recristalização metadinâmica produz grãos cerca de 1,5 vezes maiores que a recristalização dinâmica [51,66,71]. Em relação à recristalização estática, o tamanho de grão é aproximadamente 2 a 3 vezes menor [63,66].

A cinética da recristalização metadinâmica é mais rápida que a da recristalização estática, dependendo basicamente da taxa de deformação [63,66,71] e sendo pouco influenciada pela deformação aplicada [71], pela temperatura e por elementos de liga [63,66]. Como resultado, certa quantidade de grãos grosseiros geralmente ocorre durante o resfriamento após a deformação, uma vez que a deformação foi estendida até o regime de recristalização dinâmica [71].

2.4 Mecanismos de Endurecimento nos Aços

A determinação de uma ótima combinação de propriedades dos aços envolve o conhecimento dos mecanismos de endurecimento, os fatores que os controlam e seus efeitos sobre outras propriedades [74].

Os principais mecanismos a serem considerados são [74,75]:

- Solução sólida;
- Dispersão de precipitados;
- Discordâncias;
- Tamanho de grão;
- Transformações de fases.

A seguir serão comentados estes mecanismos.

2.4.1 Endurecimento por solução sólida

O endurecimento por solução sólida pode ser causado por átomos substitucionais e intersticiais, figura 43. O efeito de substitucionais é inicialmente dependente da diferença de tamanho entre os átomos do soluto e do solvente. Os átomos substitucionais do soluto causam uma distorção simétrica [56,57] na estrutura do solvente que leva a pequenos efeitos de aumento na resistência. Em geral, solutos substitucionais em soluções sólidas diluídas, como a ferrita, aumentam linearmente a resistência [74-77].

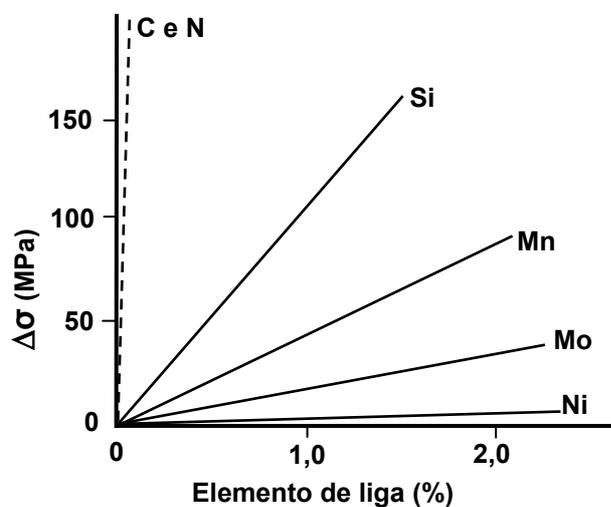


Figura 43 – Efeitos de endurecimento por solução sólida em aço de baixo carbono [56,74].

Solutos intersticiais, como o carbono e o nitrogênio na ferrita, introduzem uma distorção estrutural assimétrica [56,57], a qual produz um aumento na resistência de 10 a 100 vezes a dos elementos substitucionais. O aumento na resistência por intersticiais tem mostrado ser proporcional à raiz quadrada da concentração do soluto, porém para baixas concentrações é assumida uma dependência aproximadamente linear com a porcentagem em peso do elemento em solução [74,75,76]. Um aumento maior na resistência ocorre quando estes solutos intersticiais interagem com as discordâncias [54,74,76]. O carbono fornece a maior contribuição para o aumento da resistência por solução sólida da martensita [74,75,76].

2.4.2 Endurecimento por dispersão de precipitados

O endurecimento por precipitados possui uma grande importância tecnológica para o aço. Os parâmetros relevantes são a resistência, a fração volumétrica, o espaçamento, a forma e a distribuição das partículas que representam obstáculos efetivos para a movimentação das discordâncias [61].

Nos aços, o aumento da resistência ocasionada pelos precipitados está relacionado com a presença de carbonetos, carbonitretos e/ou nitretos.

Mais importante que o tamanho dos precipitados é a sua dispersão na matriz, a qual determinará o aumento da resistência [74,76]. Orowan [55,56,75,76], assumindo partículas esféricas indeformáveis, mostrou que o limite de escoamento (σ_y) é inversamente proporcional ao espaçamento entre partículas (λ):

$$\sigma_y = \sigma_s + \frac{2T}{b\lambda} \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

onde: σ_s é o limite de escoamento da matriz, T é a tensão causada pela discordância e b é o vetor de Burgers.

Ashby [55,56,78] modificou a equação 5, ao considerar o diâmetro das partículas, como mostrado a seguir:

$$\sigma_y = \frac{5,9\sqrt{f}}{\bar{x}} \cdot \ln\left(\frac{\bar{x}}{2,5 \cdot 10^{-4}}\right) \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

onde: f é a fração volumétrica das partículas e \bar{x} é o diâmetro médio das partículas.

2.4.3 Efeito da densidade de discordâncias

O limite de escoamento (σ_y) aumenta proporcionalmente com a densidade de discordâncias (ρ) e, portanto, é muito dependente da distribuição e interação das discordâncias [74-77,80]. A variação de σ_y com ρ é mostrada na equação 7:

$$\sigma_y = \sigma_o + k(\rho)^{1/2} \quad [\text{MPa}] \quad (7)$$

onde: σ_o é o limite de escoamento devido a outros mecanismos de endurecimento e k é uma constante que incorpora o módulo de cisalhamento e o vetor de Burgers.

Em geral, aumentando-se a densidade de discordâncias diminui-se tanto a ductilidade quanto a tenacidade [74].

2.4.4 Efeito do tamanho de grão

Foi estabelecido que o limite de escoamento, σ_y , aumenta com a diminuição do tamanho de grão e a sua dependência é dada pela relação de Hall-Petch:

$$\sigma_y = \sigma_i + k_y d^{-1/2} \quad [\text{MPa}] \quad (8)$$

onde: σ_i é a tensão de fricção interna, k_y é uma constante e d é o diâmetro do grão [54,55,57,74-77,79]. Os valores de σ_i e k_y são constantes dependentes do material.

A figura 44 mostra a dependência do limite de escoamento com o tamanho do grão para diversas temperaturas de ensaio. Efeitos similares foram obtidos para contornos de alto ângulo encontrados entre os pacotes de martensita e de bainita e para a interface ferrita/cementita [54,76].

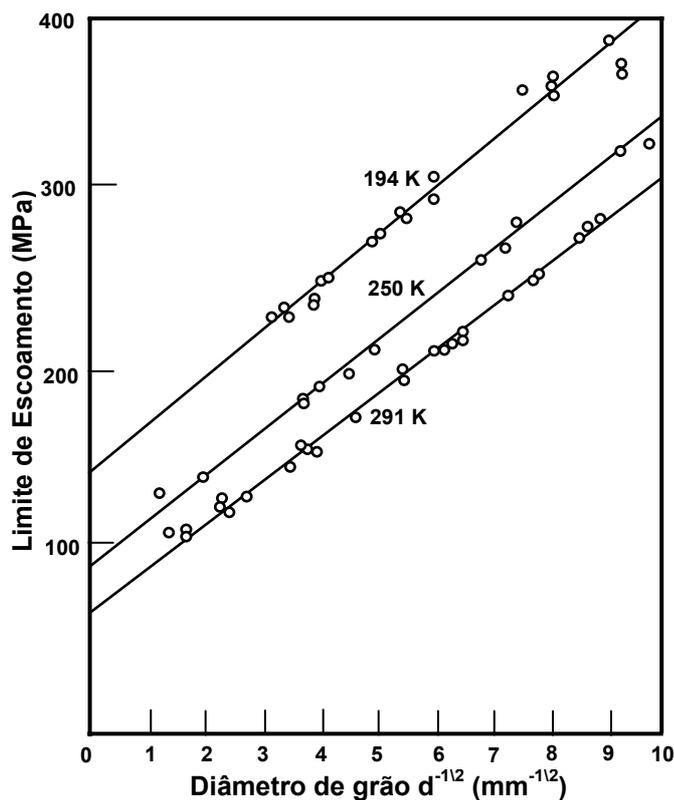


Figura 44 – Variação do limite de escoamento de um aço baixo carbono com o tamanho de grão ferrítico para diversas temperaturas de ensaio [75,76].

2.4.5 Transformações de fases

Nos aços, os efeitos produzidos pelas transformações são largamente relacionados à temperatura em que ela ocorre. Em geral, quanto menor a temperatura de transformação, maior será a resistência (figura 45). De modo geral, quanto menor a temperatura de transformação:

- Menor será o tamanho de grão do produto da transformação;
- Maior será a densidade de discordâncias;
- Mais fina será a dispersão de todas as fases precipitadas;
- Maior será a tendência de reter soluto em solução sólida supersaturada.

A interação desses efeitos é complexa e, enquanto todos eles contribuem para o aumento da resistência, cada um possui seu efeito individual sobre outras propriedades como tenacidade ou ductilidade [74].

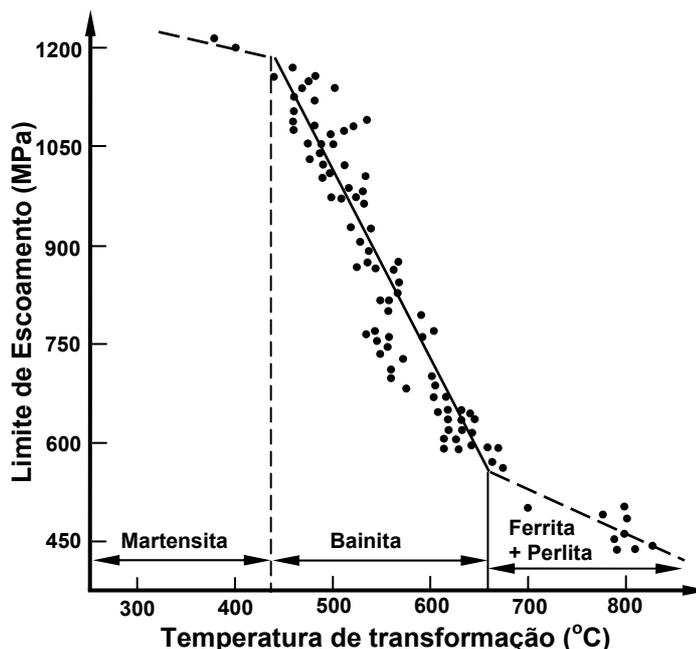


Figura 45 – Efeito da temperatura de transformação sobre o aumento da resistência de estruturas ferrítica-perlítica e bainítica [74].

2.5 Efeito das Fases Presentes

Os aspectos estruturais que controlam as propriedades dos aços são função de cada fase individual e do sinergismo entre elas. Neste sentido, a estrutura individual deve ser identificada e a sua contribuição às propriedades deve ser avaliada. Normalmente, quando se têm microestruturas mistas associam-se as propriedades à soma das contribuições individuais de cada fase através da lei das misturas [76]. Para o limite de escoamento, por exemplo, tem-se:

$$\sigma_y = \sigma_y^a(1 - f_b) + \sigma_y^b f_b \quad [\text{MPa}] \quad (9)$$

onde: σ_y^a é o limite de escoamento da fase a , σ_y^b é o limite de escoamento da fase b e f_b é a fração volumétrica da fase b .

2.5.1 Ferrita

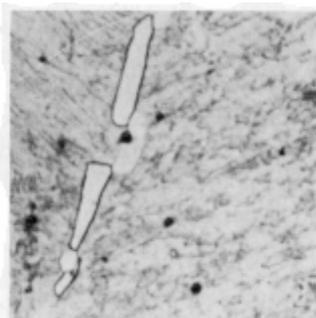
Dubé e Aaronson [75] distinguiram quatro morfologias bem definidas para a ferrita. Estas morfologias ocorrem em função da temperatura de transformação, como mostrado abaixo:

- 1) Alotriomorfa de contorno de grão [75,76]: nucleiam nos contornos de grão

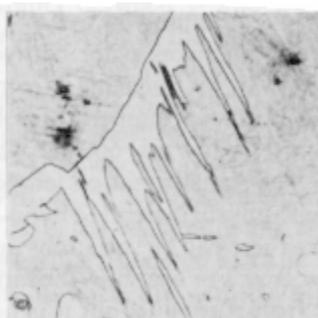
da austenita em temperaturas elevadas (800 - 850°C) e possuem contornos curvos com a austenita (Figura 46a). Têm geralmente formato equiaxial ou lenticular;

- 2) Lamelas ou ripas de Widmanstätten [75,76,79,80]: são lamelas que nucleiam nos contornos de grão da austenita, mas crescem ao longo de planos bem definidos da matriz, figura 46b;
- 3) Idiomorfos intragranulares [75]: são aproximadamente equiaxiais, nucleiam no interior dos grãos de austenita (figura 46c) e que possuem contornos curvos ou com características cristalográficas bem definidas.
- 4) Lamelas intragranulares [75]: são semelhantes às que crescem a partir dos contornos de grão, mas nucleiam exclusivamente no interior dos grãos de austenita (figura 46d).

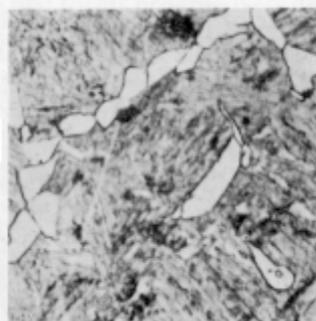
a) Aço 0,34% C,
12 min a 790°C.
Alotriomorfos
ferríticos de
limite de grão.



b) Aço 0,34% C,
15 min a 725°C.
Ferrita de
Widmanstätten
crescendo a
partir da ferrita
de limite de
grão.



c) Aço 0,34% C,
12 min a 790°C.
Alotriomorfos de
limite de grão e
idiomorfos
intragranulares
de ferrita.



d) Aço 0,34% C,
15 min a 725°C.
Lamelas de
ferrita de
Widmanstätten
intragranulares.

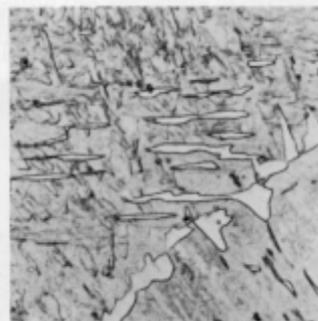


Figura 46 – Crescimento de ferrita pró-eutetóide [75].

A seguir será discutido o relacionamento entre as estruturas equiaxiais e suas propriedades.

A característica relevante da ferrita é o grão ferrítico, o qual é normalmente relacionado com o grão austenítico inicial [76].

O limite de escoamento e o tamanho de grão ferrítico são relacionados pela

equação de Hall-Petch (equação 8). Esta equação é válida para a faixa de tamanhos de grão de 0,35 até 400 μm [76,78].

Quando existe uma subestrutura nos grãos ferríticos, a equação pode ser modificada levando-se em conta o tamanho da célula [76,78]:

$$\sigma_y = \sigma_i + k_y \left\{ \left[d^{-1/2} (fr) \right] + \left[d_c^{-1/2} \frac{(1-fr)}{2} \right] \right\} \quad [\text{MPa}] \quad (10)$$

onde: d é o diâmetro de grão, d_c é o tamanho da célula e fr é a fração de grãos recristalizados.

O aumento da resistência devido ao refino de grão é o único mecanismo que também aumenta a tenacidade [76,78].

2.5.2 Perlita

A perlita é uma mistura lamelar de ferrita e cementita. A perlita é um constituinte muito comum numa grande variedade de aços e contribui significativamente para a resistência mecânica [75]. A formação da perlita se dá por processos de nucleação e crescimento, e ocorre preferencialmente nos nós entre grãos da austenita [75,76].

O nódulo de perlita mantém sua natureza esférica enquanto cresce, e a sua taxa de crescimento é mantida pela alteração da orientação ferrita/cementita dentro do grão austenítico, produzindo colônias. Cada colônia contém lamelas de carbonetos igualmente orientadas. Na perlita, os elementos que podem afetar as propriedades são: os grãos austeníticos iniciais; os nódulos de perlita; as colônias, e as lamelas de ferrita/cementita [75,76], figura 47.

A temperatura de austenitização é um fator determinante no tamanho de grão austenítico, cujos contornos são locais de nucleação dos nódulos de perlita. Para uma temperatura de transformação constante o tamanho do nódulo pode ser diretamente relacionado com o tamanho de grão austenítico inicial. Por outro lado, diminuindo-se a temperatura de transformação reduz-se o espaçamento interlamelar, o qual é independente do tamanho de grão austenítico inicial ou do tamanho do nódulo [76].

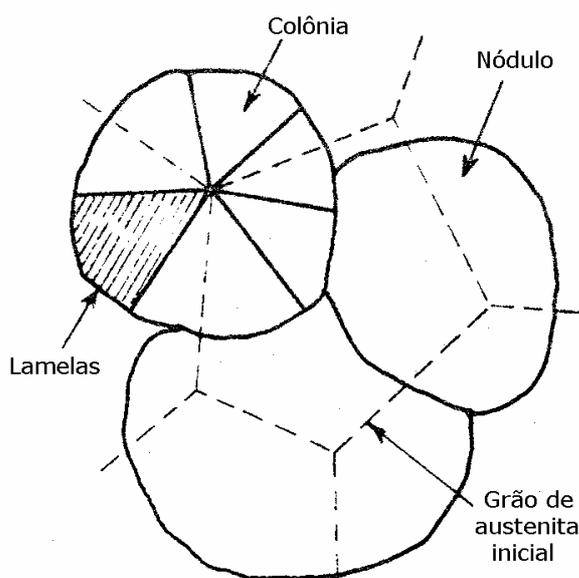


Figura 47 – Características básicas da perlita [76].

O limite de escoamento da perlita aumenta com o refino do espaçamento interlamelar da perlita [44,47]. Langford desenvolveu uma equação que descreve a dependência da tensão de escoamento do espaçamento interlamelar usando duas funções para o espaçamento interlamelar s_i [76].

$$\sigma_y = \sigma_i + k_1 s_i^{-1/2} + k_2 s_i^{-1} \dots [\text{MPa}] \quad (11)$$

onde: σ_i é a tensão de fricção interna, s_i é o espaçamento interlamelar em ηm , e k_1 e k_2 são constantes.

Esta equação é baseada no conceito da mudança no caminho livre para a movimentação de discordância, as quais alteram os mecanismos de endurecimento. A deformação total é dividida no trabalho necessário para o empilhamento de discordâncias (proporcional a a) e $s_i^{-1/2}$ no trabalho necessário para a geração de discordâncias (proporcional a s_i^{-1}) no espaço definido pela lamela de cementita [57,76]. Esta equação descreve satisfatoriamente o comportamento da perlita para um espaçamento médio lamelar na faixa de 70 a 1250 nm [76].

A tenacidade da perlita está diretamente relacionada ao tamanho de grão austenítico inicial. Com uma granulação fina ter-se-á uma menor temperatura de transição, conforme mostrado na figura 48. O tamanho da colônia de perlita e o espaçamento interlamelar não são parâmetros efetivos para o controle da tenacidade [76].

Análises fratógráficas de fratura frágil por clivagem de aços eutetóides têm mostrado que as facetas de clivagem usualmente consistem de um número de colônias de perlita. A fratura por clivagem é capaz de propagar-se através dos contornos de colônias, o que tem levado ao conceito de um tamanho de grão efetivo, ou um tamanho de bloco perlítico para a fratura por clivagem. Tem sido visto que o tamanho de grão efetivo é controlado pelo tamanho de grão austenítico. Desde que colônias adjacentes têm aproximadamente a mesma orientação da ferrita, não será difícil para as facetas da fratura passarem através dos contornos das colônias [76].

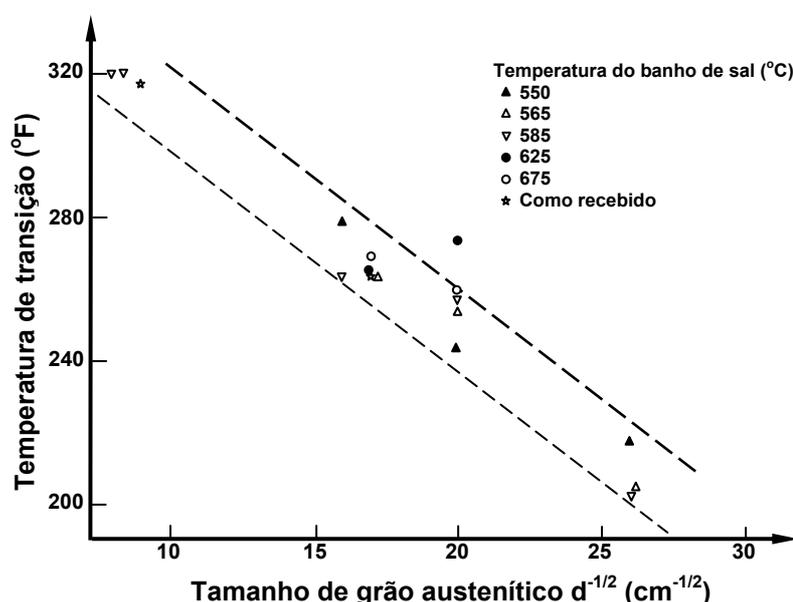


Figura 48 – Temperatura de transição versus tamanho de grão austenítico inicial [76].

A ferrita de colônias adjacentes tem aproximadamente a mesma orientação pois crescem a partir do mesmo grão austenítico. Entretanto, em colônias nucleadas a partir de grãos austeníticos diferentes, a ferrita não terá a mesma orientação. O caminho da trinca irá mudar somente quando a orientação da ferrita mudar no contorno da colônia. Portanto, quanto menor o grão austenítico, mais freqüente será a mudança do caminho da trinca e uma maior tenacidade será obtida [76].

O tamanho de grão austenítico controla o “tamanho de grão efetivo” que determina a tenacidade e também o diâmetro dos nódulos de perlita, conforme mostrado na figura 49 [76].

A figura 49 também mostra que a temperatura de transformação é um parâmetro para o controle do “tamanho de grão efetivo” desde que o número de

sítios para a nucleação dos nódulos aumente com o decréscimo da temperatura de transformação para qualquer tamanho de grão austenítico anterior [76].

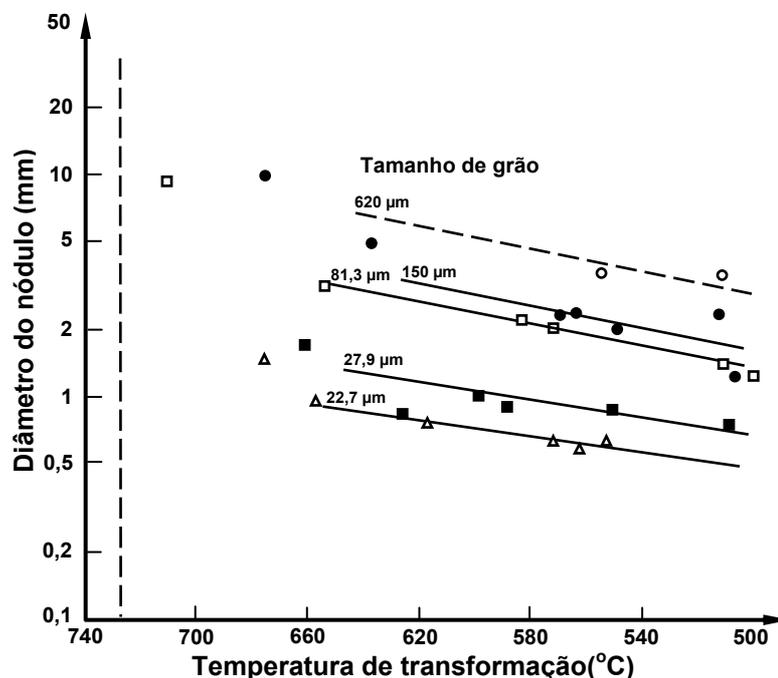


Figura 49 – Efeito da temperatura de transformação sobre o diâmetro do nódulo para tamanhos de grãos austeníticos iniciais diferentes [76].

2.5.3 Martensita

A martensita em aços de baixa liga se forma, basicamente, com duas morfologias: a martensita em ripa e a martensita em placa (ou maclada). A formação destas depende do teor de carbono e/ou da adição de elementos de liga [75,76].

Devido ao trabalho envolver apenas aços de baixo carbono, não será abordada a martensita em placa.

Na martensita em ripas (que é encontrada em aços-carbono e fracamente ligados, com $C < 0,6\%$ [75,76]) ocorre uma nucleação lado a lado de ripas ou grupos de ripas que formam uma frente que se move através da matriz austenítica. Estas ripas adjacentes e paralelas têm o mesmo plano de hábito. Podem ser separadas por contornos de baixo ou alto ângulo ou por austenita retida, formando um pacote. Vários pacotes podem ser encontrados em um único grão de austenita. Dentro de cada pacote podem ser encontrados blocos de ripas com a mesma orientação [75,76,81], como mostrado esquematicamente na figura 50 [76]. As ripas têm alta

densidade de discordâncias arranjadas em células, existindo várias células por ripa [75,81]. Deste modo, na determinação da relação entre propriedades mecânicas e microestruturas na martensita em ripas, deve-se considerar a influência dos seguintes elementos microestruturais: o grão austenítico inicial, os pacotes, os blocos, as ripas [76,81] e as células [81].

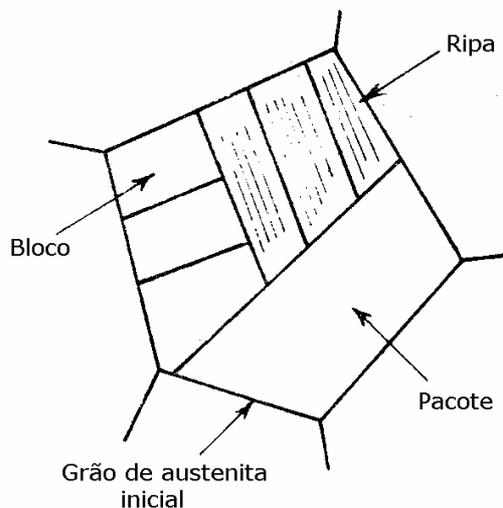


Figura 50 – Características microestruturais da martensita em ripas [76].

Os fatores que podem ser considerados como afetando a resistência da martensita são [76,78]:

- Endurecimento por elementos substitucionais;
- Endurecimento por elementos intersticiais;
- Precipitação ou segregação de carbono;
- Aumento da resistência por subestrutura;
- Efeito do tamanho efetivo de “grão”.

Estudos realizados em aços de baixa liga [76] verificaram um endurecimento por solução sólida de 35 Pa por % de Mn e 21,5 Pa por % Ni. Em geral os elementos intersticiais, especificamente o carbono, aumentam o limite de escoamento na razão da raiz quadrada do seu teor [76,78,81], como mostrado na equação 12 para a martensita de baixo carbono [76,82]:

$$\sigma_y = 413,7 + 1722(\%C)^{1/2} \quad [\text{MPa}] \quad (12)$$

O termo constante da equação inclui todas as contribuições estruturais para a

resistência da martensita e, apesar de poder ocorrer segregação em aços de baixo carbono, este efeito não é muito sensível [76].

Foi indicado que o carbono fornece a maior contribuição no aumento da resistência quando em solução sólida [76,81], sendo que metade do efeito está associado com a sua segregação e interação com as discordâncias [81].

Estudos em um aço com 0,2% C mostraram que o tamanho dos pacotes das ripas foi o aspecto microestrutural dominante sobre a resistência da martensita em ripa, como pode ser visto na figura 51 [76].

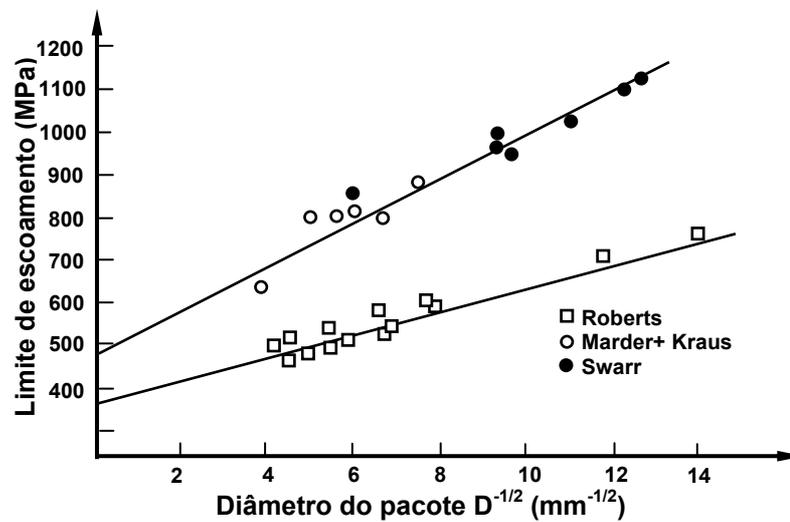


Figura 51 – Limite de escoamento versus diâmetro do pacote D , para aço com 0,2% C (Marder e Krauss, Swarr) e aço ao Mn (Roberts) [76].

O maior efeito do tamanho do pacote é atribuído à interação do carbono e/ou carbonetos muito finos segregados com os contornos dos pacotes [76].

O efeito no limite de escoamento da densidade de discordâncias na martensita de baixo carbono foi estimado ser da ordem de 150 a 300 MPa [78,81].

Norstrom [76,81] propôs a equação abaixo para a tensão de escoamento da martensita em ripa ou de baixo carbono:

$$\sigma_y = \sigma_o + \sigma_i + K_y D^{-1/2} + \alpha G b (\rho_{tot})^{1/2} \quad [\text{MPa}] \quad (13)$$

onde: σ_i é a tensão de atrito para o ferro- α , σ_o é o efeito de endurecimento por solução sólida, K_y é a constante de Hall-Petch para o tamanho do pacote D , α é uma constante, G é o módulo de cisalhamento, b é o vetor de Burgers, e ρ_{tot} é a densidade de discordâncias total.

A densidade de discordâncias total, ρ_{tot} , pode ser expressa como:

$$\rho_{tot} = \rho_o + K(\%C) + \frac{\theta}{b} \frac{2}{d_r} \quad (14)$$

onde: ρ_o é a densidade de discordâncias dentro das ripas, K é uma constante, $\%C$ é o teor de carbono, θ é a desorientação entre as ripas e d_r é a largura da ripa.

A contribuição à resistência pelo termo ρ_{tot} está relacionada com as discordâncias nas ripas de martensita, contornos das ripas e pela densidade de discordância controlada pelo teor de carbono [76].

Com relação à tenacidade, o tamanho das facetas de clivagem da martensita em ripa está relacionado com o tamanho dos pacotes da martensita [76,78,82]. A fratura da martensita ocorre através dos contornos dos pacotes e dos grãos da austenita prévia [76,78]. Estimou-se que para uma diminuição de 10 μm no tamanho dos pacotes, a temperatura de transição pode diminuir de até 20°C [76].

A presença de martensita maclada diminui a tenacidade à fratura dos aços. Fatores como carbono em solução, tamanho, forma e distribuição dos carbonetos e inclusões, a presença de austenita retida e/ou a sua transformação posterior e segregação de impurezas podem afetar a tenacidade em maior grau do que a presença de martensita maclada [81,82].

2.5.4 Bainita

Classicamente, os produtos da reação bainítica, obtidos por resfriamento isotérmico de aços carbono são: bainita inferior e bainita superior [81,83,84]. Estas são as duas variações morfológicas mais importantes na maioria dos aços carbono e aços ligados [85]. Duas outras formas morfológicas podem ser encontradas, bainita nodular – em aços com elevado carbono (eutetóides e hipereutetóides) [85] e, bainita granular [81,83-88].

Neste trabalho somente serão discutidas as estruturas bainíticas inferior e superior.

As bainitas superior e inferior são distintas tanto morfológica como pelo relacionamento da orientação entre a ferrita e o carboneto (figura 52) [75,76,89].

A bainita superior contém ferrita em ripa, as quais são nucleadas lado a lado em pacotes [75,76,89,91], e ocorre em temperaturas acima de 350°C em aços contendo mais que 0,6% C [76]. O carbono livre se difunde para a austenita na

frente das ripas de bainita de modo que a austenita enriquecida de carbono possa (1) ser retida, (2) formar martensita de alto carbono ou (3) formar cementita entre ripas. As ripas ferríticas da bainita tornam-se finas e os carbonetos dos contornos das ripas se tornam mais numerosos, enquanto o teor de carbono aumenta e a temperatura de transformação diminui [76].

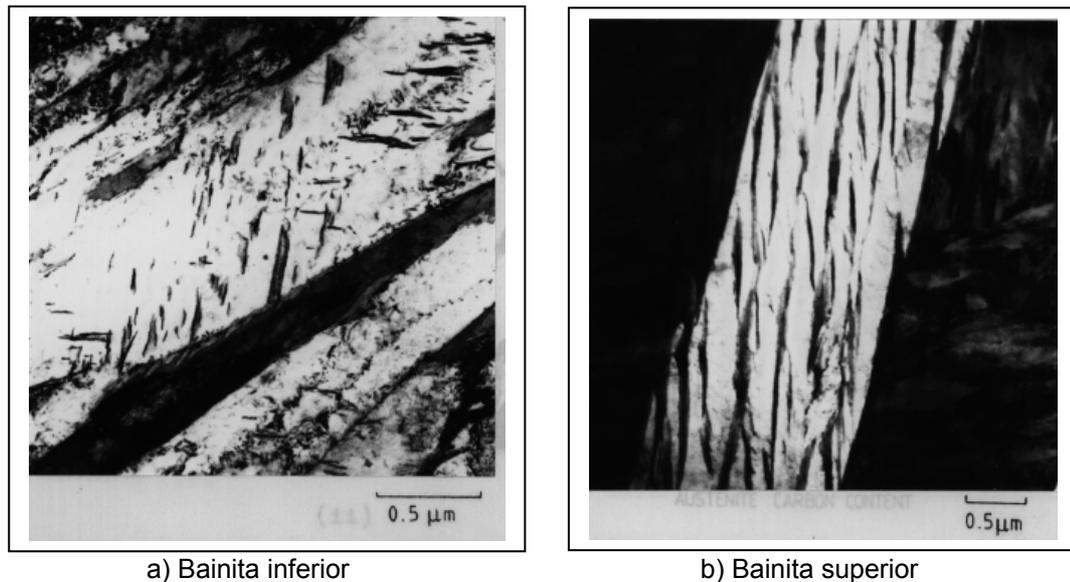


Figura 52 – Estruturas bainíticas [90].

A bainita inferior, entretanto, se apresenta na forma de placas ou ripas com um plano de hábito irracional, contendo carbonetos dentro das ripas [75,76,89,91]. Conforme a temperatura de transformação é diminuída ou o teor de carbono aumenta, as ripas de ferrita tornam-se finas e o número de partículas de carboneto aumenta [75,76]. O contorno das ripas no interior de um pacote tanto da bainita superior como da inferior normalmente são contornos de baixo ângulo os quais podem impedir o movimento de discordâncias. Ao contrário, o contorno dos pacotes, que se relacionam com os contornos dos grãos austeníticos iniciais, são contornos de alto ângulo, os quais impedem a propagação de trincas [76].

Na bainita, semelhante à martensita, os grãos austeníticos originais, os pacotes, blocos e as ripas podem contribuir para as propriedades mecânicas [76].

O aumento na resistência da bainita é devido às seguintes características estruturais [75,78]:

- Tamanho das ripas de bainita, que tem uma relação de Hall-Petch com o limite de escoamento, figura 53;

- Densidade de discordâncias, que aumenta com o decréscimo da temperatura de transformação;
- Dispersão de carbonetos, que aumenta com o decréscimo da temperatura de transformação e com o aumento do teor de carbono, figura 54;
- Aumento da resistência por solução sólida intersticial.

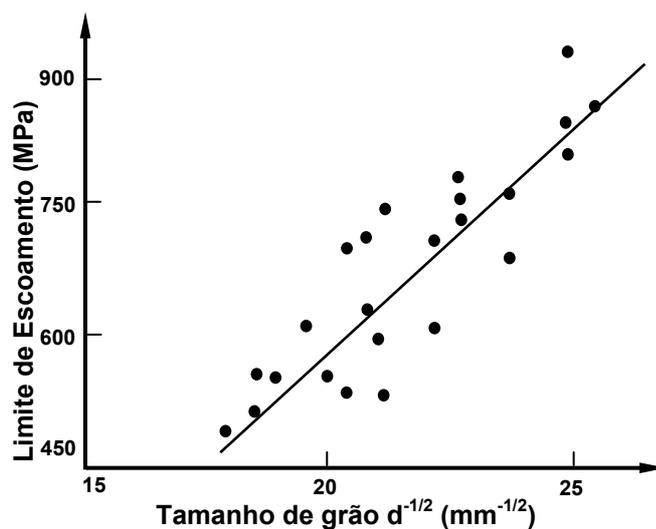


Figura 53 – Efeito do tamanho de grão da ferrita bainítica sobre o limite de escoamento [76].

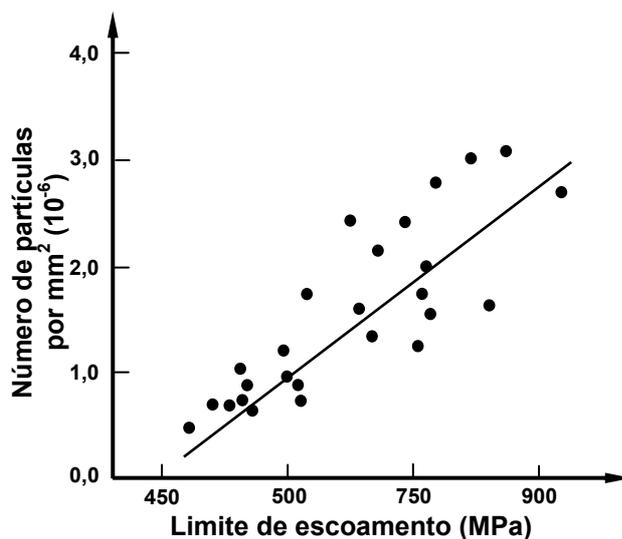


Figura 54 – Efeito da dispersão de carbonetos sobre o limite de escoamento (0,2%) [76].

Uma análise por regressão linear forneceu a equação abaixo para o limite de escoamento (0,2%) [76]:

$$\sigma_y = -194 + 17,4d_b^{-1/2} + 151,1n_c^{1/4} \quad [\text{MPa}] \quad (15)$$

onde: d_b é o tamanho da ripa de bainita em mm e n_c é o número de carbonetos por mm^2 .

A natureza empírica da análise é evidenciada pela constante negativa na equação, o que indica um limite para a distribuição de carbonetos, abaixo do qual os carbonetos não contribuem para a resistência do material. Como resultado, os carbonetos da bainita superior de aços de mais baixo carbono não contribuem para o aumento da resistência devido a sua precipitação nos contornos das ripas. Deste modo, somente na bainita inferior e na bainita superior de alto carbono haverá uma contribuição significativa no aumento da resistência por dispersão de carbonetos [76].

Outras análises [76,78] incluem a densidade de discordâncias, mas omitem o tamanho das ripas da bainita ou mostram uma relação entre o tamanho das ripas e a resistência de d^1 . A dureza tem sido relacionada ao tamanho dos pacotes bainíticos, entretanto, um estudo definitivo sobre o efeito do tamanho dos pacotes na resistência da bainita não foi relatado [76,78].

Foi observado para bainitas de diferentes composições que a bainita superior possui tenacidade mais baixa do que a bainita inferior, para níveis comparáveis de resistência, figura 55 [76].

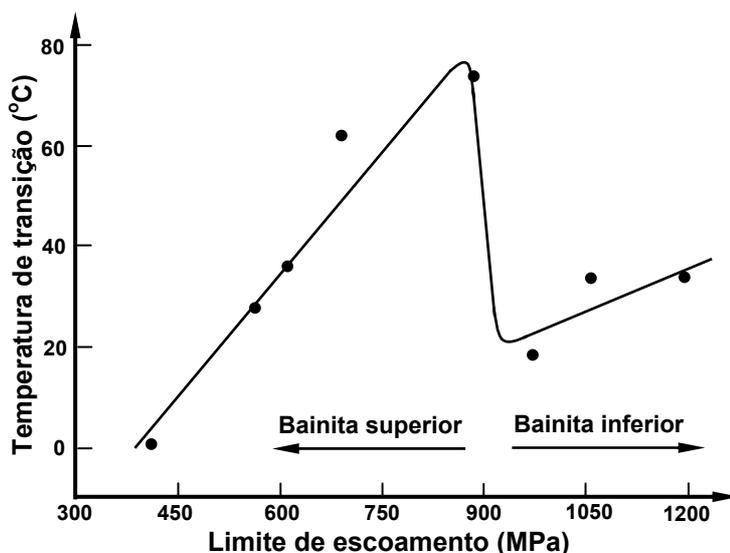


Figura 55 – Efeito do limite de escoamento e da morfologia da bainita sobre a temperatura de transição de aços bainíticos de baixo carbono [76].

O comportamento da curva se deve ao fato de que [76]:

- Na bainita superior, os carbonetos grandes ou as áreas de martensita de alto carbono localizadas nos contornos das ripas das ferritas bainíticas se quebram para formar defeitos supercríticos. As trincas se propagarão porque somente são obstruídas por contornos de alto ângulo dos pacotes da bainita ou os contornos dos grãos austeníticos anteriores.
- Na bainita inferior, a fratura frágil não se inicia facilmente porque os pequenos carbonetos não quebram. Depois que a trinca é iniciada, a sua propagação é obstruída pelos muitos carbonetos existentes e pela alta densidade de discordâncias.

Estas características sugerem que na bainita superior a melhoria da propriedade de impacto ocorre somente através do refino de grão austenítico, enquanto que na bainita inferior há a possibilidade de melhoria por revenimento [76].

2.5.5 Microestruturas mistas

A maioria dos materiais comerciais possui microestruturas mistas e o entendimento dos efeitos de cada constituinte nas propriedades mecânicas resultantes é importante a partir do ponto de vista da configuração da liga. Os fatores que influenciam as propriedades mecânicas de aços multifásicos podem ser listados como segue [76]:

- Fração volumétrica de cada fase;
- Tamanho de grão de cada fase;
- Forma e distribuição de fases;
- Relação da tensão de escoamento das fases;
- Energia ou resistência da interface.

Microestruturas multifásicas afetam as propriedades de diferentes maneiras dependendo da combinação dos produtos de transformação.

3 OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho tem como objetivo principal o estudo das relações existentes entre o processo de furação por escoamento, as alterações microestruturais impostas ao material-base e as características mecânicas desenvolvidas em aços de baixo carbono.

Para determinar essas relações o trabalho concentra-se nos seguintes estudos:

- 1) influência dos parâmetros de trabalho, da variação da composição química do material e da espessura da chapa sobre as características do processo;
- 2) influência das características do processo, mais especificamente do trabalho termomecânico, sobre as transformações microestruturais no material-base na região de deformação;
- 3) influência das transformações microestruturais na região de deformação sobre as propriedades mecânicas da bucha escoada e roscada por conformação através de ensaios mecânicos.

No desenvolvimento do trabalho é empregada uma ferramenta de 11,0 mm de diâmetro e os parâmetros de trabalho (velocidade de avanço e rotação) são mantidos constantes em processo. Os materiais constituem-se de aços ABNT 1006 e 1010, com espessuras de 2,65 e 4,75 mm.

É avaliada a influência da variação dos parâmetros de trabalho, da espessura do material e do teor de carbono sobre a força de avanço e momento torçor, sobre a potência mínima necessária, sobre a qualidade e geometria das buchas escoadas, e sobre a temperatura e trabalho de conformação.

As microestruturas obtidas na região de deformação são relacionadas com a energia termomecânica introduzida no material pelo processo, através do trabalho de conformação e da temperatura gerada.

As influências das transformações microestruturais sobre as propriedades mecânicas são determinadas através de ensaios de microdureza e de resistência à tração. Os ensaios de resistência à tração objetivaram determinar também a carga máxima resistente e a classe de resistência das buchas roscadas.

4 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Metodologia

Para a realização do estudo, a metodologia empregada foi baseada na realização de ensaios experimentais do processo de furação por escoamento.

Nestes ensaios foram empregadas grandezas de entrada do processo que permitiram a introdução de diferentes níveis de energia térmica e de deformação no material dos corpos de prova. O emprego destas grandezas se deve, além do interesse tecnológico, à necessidade de estudos mais aprofundados permitindo, deste modo, uma melhor avaliação das relações existentes entre as microestruturas obtidas com as propriedades mecânicas do produto, neste caso, buchas escoadas.

Estudaram-se, nos ensaios, algumas grandezas de entrada do processo consideradas relevantes na modificação das microestruturas e das propriedades mecânicas das buchas escoadas obtidas, a saber: parâmetros de trabalho, teor de carbono e espessura do material.

Como parâmetros de trabalho foram considerados a velocidade de avanço (v_f) e a rotação (n). Com o aumento da velocidade de avanço são impostas maiores taxas de deformação, e com a utilização de rotações mais elevadas aumenta a quantidade de energia fornecida ao material da peça [1,21]. Avaliaram-se para estes parâmetros somente valores constantes em processo, isto é, não ocorreram variações dos valores da velocidade de avanço e da rotação durante o processo de deformação do material (obtenção da bucha escoada).

O efeito da variação do teor de carbono foi avaliado empregando-se chapas de aço ABNT 1006 e 1010, laminadas a quente. A influência da variação da espessura foi avaliada através do emprego de chapas de 2,65 mm e 4,75 mm. A escolha destas composições se deve a sua grande utilização industrial, e a possibilidade de comparação com resultados da literatura. As espessuras das chapas, além de serem amplamente empregadas para aplicação do processo na indústria, são valores limites para o diâmetro da ferramenta de furação por escoamento utilizada [14,92].

A ferramenta de furação por escoamento empregada nos ensaios era de metal duro com diâmetro de 11,0 mm, apropriada para a confecção de roscas M12, que são dimensões de uniões desmontáveis largamente empregadas pela indústria.

No estudo das características do processo foram analisadas as grandezas mais relevantes do ponto de vista de introdução de energia no processo e de solicitações na máquina-ferramenta. Foram determinadas a força de avanço, o momento torçor, a temperatura desenvolvida, o tempo de processamento e a potência mínima necessária. Além dessas, também foi determinado o trabalho de conformação.

Como resultados de trabalho foram avaliadas a geometria da bucha - em função do comprimento, ℓ , e espessura da parede, e_p -, a qualidade da rebarba inferior - em função da relação do seu comprimento com a profundidade de ruptura, δ - e a influência termomecânica sobre a microestrutura do material. O estudo da influência termomecânica foi realizado com o emprego de técnicas de análise microestrutural e de ensaios mecânicos.

Para a determinação dos valores de velocidade de avanço (v_f) e de rotação (n) (parâmetros de trabalho) explorados no estudo, foram realizados diversos ensaios preliminares. Durante a realização destes ensaios foram monitorados os esforços gerados (força de avanço e momento torçor) e a temperatura desenvolvida e, após, as buchas escoadas foram classificadas segundo a qualidade da rebarba inferior e as suas dimensões principais foram determinadas (espessura de parede, comprimento total).

Como valores para a velocidade de avanço foram utilizados 100, 200 e 300 mm/min. Cada velocidade de avanço foi combinada com os valores de rotação de 1000, 2000, 3000, 4000 e 5000 min^{-1} . Os ensaios foram realizados empregando-se uma ferramenta de furação por escoamento de metal-duro, com diâmetro de 11,00 mm, de 4 lóbulos, do tipo longa, com colar conformador. Os corpos de prova foram confeccionados a partir de chapas de aço laminadas a quente ABNT 1012, com 2,65 mm de espessura. Para a realização dos ensaios preliminares empregou-se a mesma infraestrutura utilizada para a realização dos ensaios finais.

Os critérios para a seleção dos valores dos parâmetros de trabalho foram a qualidade obtida pela rebarba inferior da bucha produzida, os valores dos esforços gerados (força de avanço e momento torçor) e a temperatura desenvolvida. Quanto

à qualidade da rebarba inferior da bucha, a mesma deveria permanecer dentro das classes I e II; quanto aos esforços gerados, os valores individuais obtidos para cada componente em função das combinações de parâmetros de trabalho não deveriam ser semelhantes, gerando taxas de deformação diferenciadas no material; e quanto a temperatura, os valores deveriam apresentar diferença significativa e serem próximos ou mais elevados que a temperatura de início de transformação austenítica (Ac1).

4.2 Condições de Trabalho

A partir dos resultados obtidos nos ensaios preliminares foram selecionados os valores de velocidade de avanço (v_f) e rotação (n) da ferramenta que, além de produzirem uma bucha escoada com qualidade, promoveram valores diferenciados de deformação e de temperatura na região de deformação do material.

A tabela 2 abaixo apresenta as condições de trabalho empregadas nos ensaios.

Tabela 2 – Condições de trabalho empregadas nos ensaios finais.

Velocidade de Avanço (v_f) [mm/min]	Rotação (n) [min ⁻¹]
100	5000
200	4000
300	3000

Para a confecção das roscas nas buchas escoadas foi utilizada a rotação de 300 min⁻¹. O emprego de apenas uma rotação objetivou não introduzir mais uma variável de influência, o que aumentaria o número de análises a serem realizadas, e com isso elevaria consideravelmente o tempo e os custos do trabalho.

Com o aumento da espessura da chapa, aumenta o volume de material a ser conformado durante a furação por escoamento. Apesar de ser empregada apenas uma ferramenta em todos os ensaios, a quantidade de material deslocado para formar a rebarba superior e inferior da bucha variou em função da espessura do material trabalhado. O volume de material que ascende aumenta com o aumento da

espessura da chapa. Deste modo, durante a penetração da ferramenta no material, o colar conformador inicia a conformação da rebarba superior em comprimentos de furação diferentes.

Em função disso, para a realização dos ensaios nos corpos de prova obtidos a partir de chapas com 2,65 mm de espessura foi empregado um comprimento de furação de 25,4 mm, enquanto para os corpos de prova com espessura de 4,75 mm, o comprimento de furação foi de 24,5 mm.

4.3 Ferramentas e Lubrificantes

Na realização dos ensaios, para confeccionar as buchas escoadas, utilizou-se uma ferramenta de furação por escoamento de metal-duro com 11,00 mm de diâmetro, do tipo longa, com quatro lóbulos e colar conformador. Em função da sua longa vida (pequeno desgaste) [13,14,32], empregou-se apenas uma ferramenta em todos os ensaios. A figura 56 apresenta as dimensões da ferramenta empregada. A bucha obtida com essa ferramenta é adequada para a produção de uma rosca métrica normal M12. Na confecção das roscas foi empregado um macho laminador, com cinco cantos, de aço-rápido revestido com TiN (figura 26). As ferramentas empregadas foram cedidas pela empresa Zecha Carbide Tool Manufacturers, da Alemanha.

Nos ensaios de furação por escoamento foi empregado o lubrificante sólido FdKS, que possui a capacidade de lubrificação a elevadas temperaturas, sendo o mesmo aplicado de forma manual sobre a ferramenta. No rosqueamento por conformação foi empregado o óleo de corte FtMA, com aditivos de extrema pressão (EP). Os lubrificantes foram cedidos pela empresa Flowdrill B.V [13].

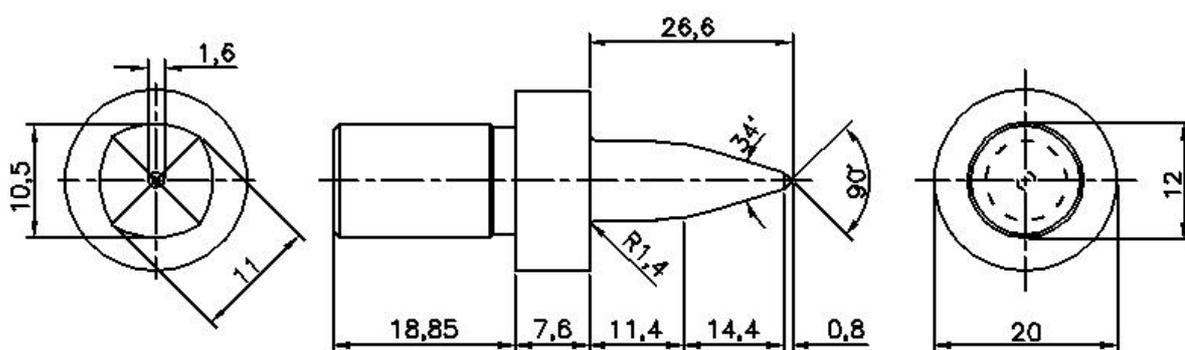


Figura 56 – Dimensões da ferramenta de furação por escoamento empregada.

4.4 Materiais Empregados

Os corpos de prova empregados nos ensaios de furação por escoamento foram confeccionados a partir de chapas de aço ABNT 1006 e 1010, laminadas a quente, com diferentes composições químicas e diferentes espessuras. As chapas foram utilizadas como recebidas, ou seja, não sofreram qualquer preparação anterior aos ensaios.

Para a identificação dos corpos de prova empregou-se uma combinação de 4 (quatro) caracteres alfanuméricos: os dois caracteres iniciais identificam o material e a espessura do corpo de prova; os dois caracteres finais identificam as condições de trabalho empregadas no ensaio.

A tabela 3 apresenta o sistema de codificação empregado para diferenciar os materiais (composição química e espessura), e a tabela 4 apresenta os códigos empregados nos corpos de prova, de acordo com o material e as condições de trabalho (velocidade de avanço e rotação).

Tabela 3 – Codificação empregada segundo o material e a espessura do corpo de prova.

Código	Material	Origem	Espessura
A2	1010	Cosipa	2,65 mm
B2	1006	CSN	2,65 mm
B4	1006	Cosipa	4,75 mm
C4	1010	CSN	4,75 mm

Na tabela 5 apresenta-se a microestrutura dos materiais e a respectiva composição química. A composição química foi fornecida pelos respectivos fabricantes e confirmada por ensaio químico. A microdureza, o diâmetro e o fator de forma médios dos grãos dos materiais estão listados na tabela 6.

Tabela 4 – Codificação empregada nos corpos de prova para identificação do material e das condições de trabalho.

Código	Velocidade de Avanço (v_f) [mm/min]	Rotação (n) [min ⁻¹]
A215	100	5000
A224	200	4000
A233	300	3000
B215	100	5000
B224	200	4000
B233	300	3000
B415	100	5000
B424	200	4000
B433	300	3000
C415	100	5000
C424	200	4000
C433	300	3000

Tabela 5 – Microestrutura e composição química dos materiais-base das amostras.

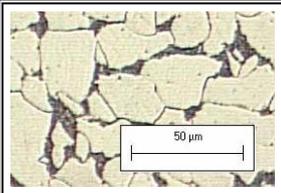
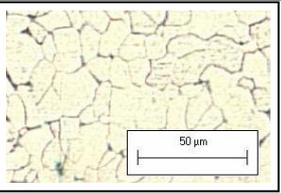
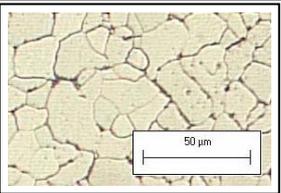
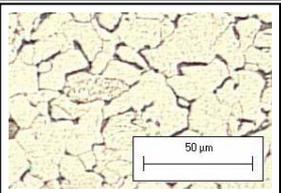
Amostra A2	Amostra B2	Amostra B4	Amostra C4
Microestrutura dos materiais			
			
Composição química			
C = 0,13%	C = 0,038%	C = 0,045%	C = 0,11%
Mn = 0,442%	Mn = 0,276%	Mn = 0,168%	Mn = 0,356%
P = 0,027%	P = 0,024%	P = 0,025%	P = 0,029%
S = 0,012%	S = 0,017%	S = 0,013%	S = 0,016%
Ni = 0,018%	Ni = 0,019%	Ni = 0,025%	Ni = 0,018%
Si = 0,012%	Si = 0,007%	Si = 0,011%	Si = 0,015%
Al = 0,052%	Al = 0,037%	Al = 0,035%	Al = 0,052%
Cu = 0,007%	Cu = 0,009%	Cu = 0,009%	Cu = 0,009%

Tabela 6 – Microdureza, diâmetro e fator de forma médios dos grãos dos materiais-base das amostras.

Microdureza HV 0,1 do Material-Base			
A2	B2	B4	C4
172	135	114	141
Diâmetro Médio, d, dos Grãos do Material-Base		Fator de Forma Médio, s _f , dos Grãos do Material-Base	
A2	14,60	A2	0,62
B2	12,06	B2	0,62
B4	15,04	B4	0,66
C4	11,02	C4	0,63

Na tabela 7 são apresentadas as principais propriedades mecânicas dos materiais empregados. As propriedades mecânicas foram determinadas através da realização de ensaios mecânicos de tração e de dureza segundo as normas NBR 6673 e NBR NR 146-1, respectivamente.

Tabela 7 – Propriedades mecânicas dos materiais-base das amostras.

	Dureza HRB	Limite de Resistência [MPa]	Limite de Escoamento [MPa]	Alongam. [%]
A2	70	402	304	33
B2	69	396	278	37
B4	68	398	272	38
C4	70	374	258	38

OBS.: valores médios de três ensaios.

4.5 Corpos de Prova

As dimensões dos corpos de prova empregados nos experimentos foram determinadas levando-se em consideração o diâmetro da ferramenta empregada, a realização de apenas uma bucha escoada em cada corpo de prova, a área da região afetada térmica e mecanicamente, e o tipo e localização dos sensores utilizados (termopares). A figura 57 ilustra os corpos de prova empregados.

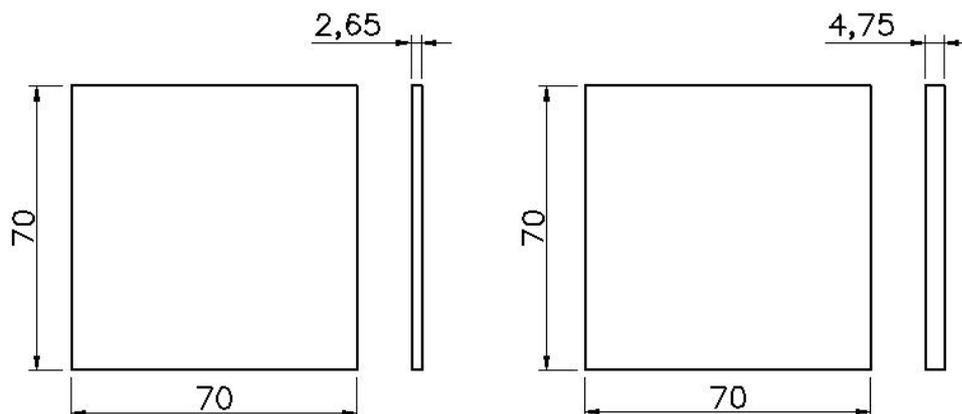


Figura 57 – Dimensões dos corpos de prova.

4.6 Dispositivo de Fixação dos Corpos de Prova

Para a fixação dos corpos de prova durante a realização dos ensaios experimentais, foi confeccionado um dispositivo com geometria e dimensões apropriadas para permitir a determinação conjunta dos esforços e da temperatura gerados. De maneira a minimizar a transferência do calor do corpo de prova para o dispositivo de fixação durante a furação por escoamento e evitar a influência do armazenamento de calor por partes metálicas, o dispositivo foi confeccionado em madeira. Somente as presilhas de fixação e os pinos-guia para posicionamento dos corpos de prova eram metálicos. O desenho do dispositivo se encontra no anexo A.

4.7 Máquina-Ferramenta

Todos os ensaios, tanto os preliminares quanto os finais, foram realizados em uma fresadora CNC, marca ROMI, modelo Polaris F400, pertencente ao LMP. As características técnicas da fresadora são apresentadas no anexo B.

4.8 Sistemas de Aquisição de Sinais

Foram utilizados dois sistemas independentes de aquisição de sinais para a obtenção das informações geradas durante a realização dos ensaios experimentais de furação por escoamento, um para o monitoramento dos valores dos esforços (força de avanço e momento torçor) e outro para o monitoramento dos valores das

temperaturas desenvolvidas.

4.8.1 Força de avanço e momento torçor

Para registrar os valores dos esforços gerados pelo processo, foi utilizado um sistema de medição que emprega sensores piezelétricos. O sistema de aquisição de sinais de força de avanço, F_f , e momento torçor, M_t , foi composto por uma plataforma piezelétrica, amplificadores de sinais e uma placa de aquisição de sinais para um computador. O sistema de aquisição foi calibrado sendo que a força de avanço apresentou $E_{máx} = \pm 68$ N e o momento torçor apresentou $E_{máx} = \pm 0,2$ Nm.

Nos experimentos foi utilizada uma freqüência de aquisição de 100 Hz, e os valores finais dos esforços foram determinados através da média aritmética dos valores registrados durante o intervalo de aquisição de três replicações para cada condição. A estrutura do sistema é apresentada na figura 58. As características técnicas dos componentes do sistema de aquisição são apresentadas no anexo C.

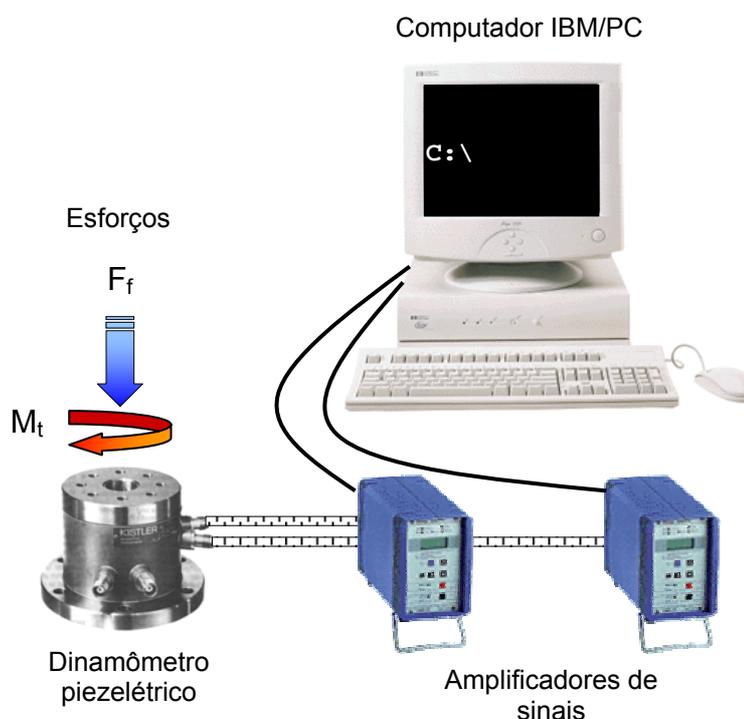


Figura 58 – Esquema do sistema de aquisição de sinais de força de avanço e momento torçor.

4.8.2 Temperatura

Os registros da evolução da temperatura desenvolvida durante o processo de furação por escoamento foram obtidos em todos os ensaios através da técnica de medição direta por sensores termoeletrônicos. O sistema de aquisição de sinais de temperatura foi composto por termopares, um multímetro, e um programa de aquisição de sinais para um computador. O sistema de aquisição foi devidamente calibrado apresentando $E_{máx} = \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Os termopares empregados eram do tipo K, com 0,25 mm de diâmetro, recomendados para uma faixa de temperatura de -200 a 1200°C , sendo os mesmos fixados na superfície inferior do corpo de prova através de soldagem por resistência. A posição de soldagem foi padronizada como sendo a 1,0 mm do centro do corpo de prova, sobre um dos eixos de simetria, conforme figura 59. A letra "O" sobre a superfície superior e inferior indica o quadrante de referência para posicionamento sobre o dispositivo de fixação. Esses procedimentos foram necessários para impedir que a ferramenta ao transpassar o material rompesse a solda e retirasse o termopar, impedindo a medição da temperatura.

O multímetro HP 34401A empregado permite o armazenamento máximo de 512 leituras em sua memória interna, sendo que a frequência de aquisição selecionada proporciona um tempo de aquisição de 20 segundos, o qual é suficiente para cobrir os períodos de aquecimento e resfriamento do processo. Após a aquisição, as leituras são transferidas automaticamente para o computador IBM-PC compatível através do programa de aquisição HP 34512A BenchLink.

A estrutura do sistema é apresentada na figura 60. As características técnicas dos componentes são apresentadas no anexo D.

Durante a conformação da bucha ocorrem deslocamentos de material da chapa nas direções axiais e radiais. O termopar, por estar soldado ao material da chapa, acompanha esses deslocamentos, tomando um posicionamento sobre a rebarba inferior, próximo a extremidade inferior da bucha. A figura 61 mostra o posicionamento do termopar após a realização da furação por escoamento.

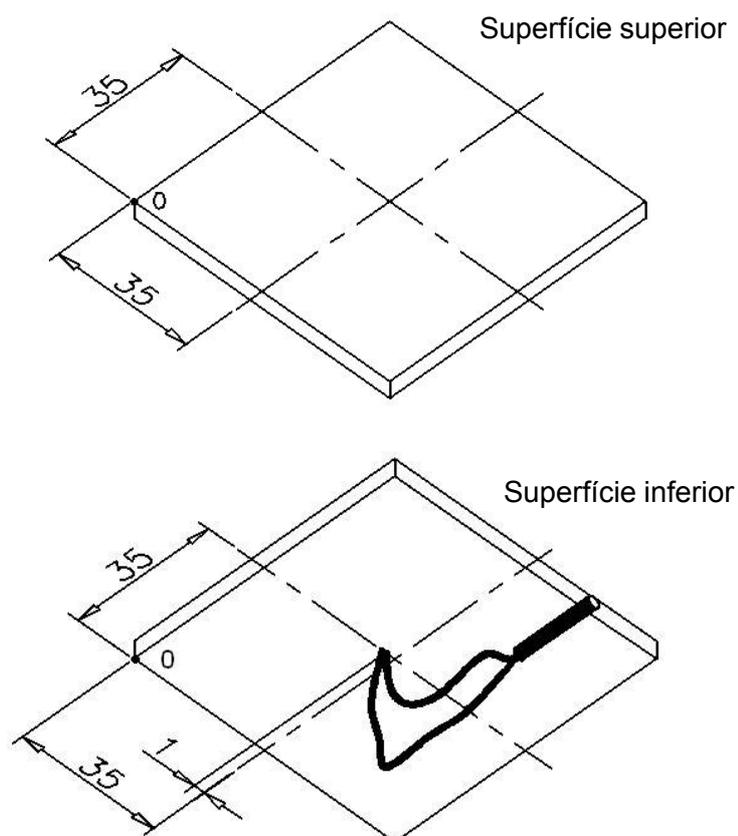


Figura 59 – Localização do centro do corpo de prova na superfície superior e posicionamento do termopar na superfície inferior do corpo de prova.

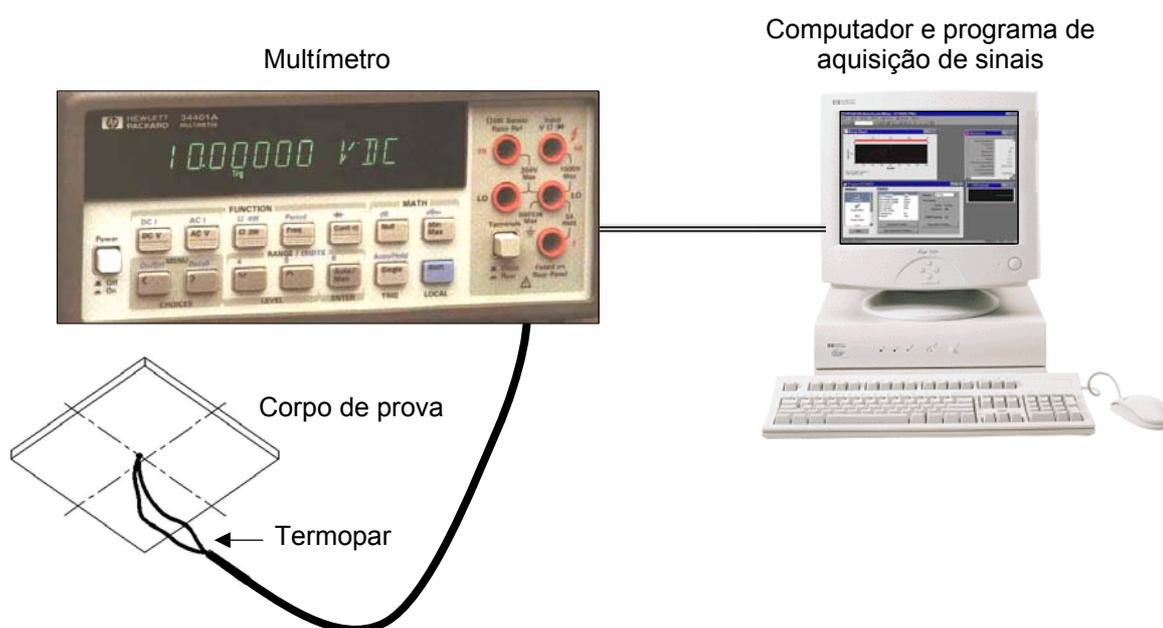


Figura 60 - Esquema do sistema de aquisição de sinais de temperatura.

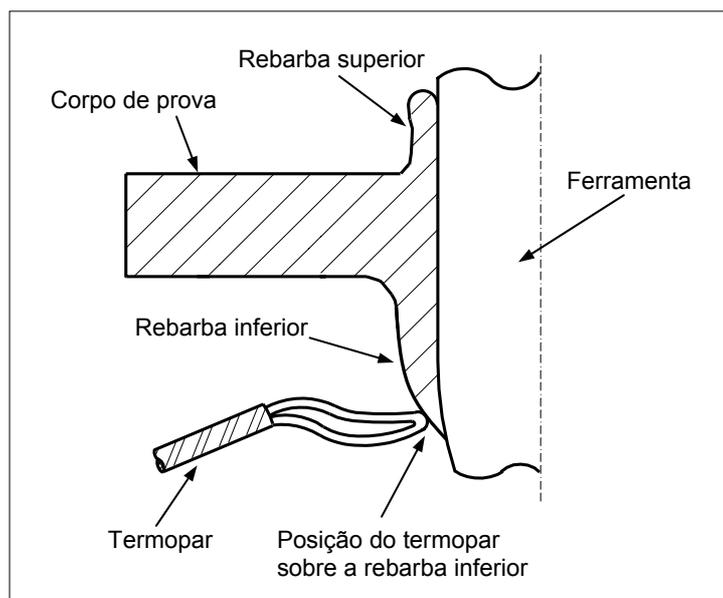


Figura 61 – Localização do termopar na rebarba inferior da bucha escoada após a furação por escoamento.

4.9 Trabalho de Conformação e Potência

A potência necessária para a conformação da bucha foi determinada a partir do valor máximo do momento torçor, $M_{tmáx}$, da fase de escoamento (figura 14). Empregou-se para o cálculo da potência mínima a equação (1), que relaciona o momento torçor com a velocidade angular da ferramenta. A velocidade angular da ferramenta é determinada pela equação (17) em função da rotação n , como segue [1]:

$$\omega = \frac{\pi}{30} \cdot n \quad [s^{-1}] \quad (17)$$

De acordo com a equação (4), o trabalho de conformação, W_T , é o somatório das parcelas referentes aos trabalhos de rotação, W_R , e translação, W_T . As equações (2) e (3) permitem determinar os valores individualizados dos trabalhos de rotação e de translação, que são obtidos através da integração da área debaixo das curvas de momentor torçor, M_t , e força de avanço, F_f , respectivamente.

Para a integração dos dados de F_f e M_t foi utilizada a técnica de integração pela somatória de Riemann (equação 18), onde o eixo X é o tempo e o eixo Y a força de avanço ou o momento torçor [1].

$$\int y dx = \sum_{i,j=1}^n \frac{Y_{j+1} + Y_j}{2} \cdot (X_{i+1} - X_i) \quad (18)$$

4.10 Geometria e Qualidade da Bucha Escoada

A geometria da bucha foi avaliada quanto à espessura da parede e_p e quanto ao comprimento da bucha, ℓ . Para a medição destas dimensões da bucha foi empregado um paquímetro digital e um micrômetro interno, com resolução de 0,02 mm e de 0,001 mm, respectivamente. O resultado da medição de cada dimensão foi determinado a partir da média de 5 leituras.

A classificação da qualidade da rebarba gerada nas buchas escoadas foi realizada levando-se em consideração a profundidade de ruptura máxima admissível para cada grupo de qualidade [24] (figura 17). Para tanto determinou-se a relação entre a profundidade de ruptura, δ , da extremidade inferior da rebarba e o comprimento total, ℓ , da bucha. Foram realizadas 5 medições da profundidade de ruptura em diferentes posições sobre o perímetro da extremidade inferior da bucha e, para efeito de classificação, considerou-se a maior profundidade de ruptura encontrada. As medições foram realizadas com o paquímetro digital descrito anteriormente.

4.11 Análise Metalográfica

No estudo das transformações microestruturais impostas ao material pelo processo, foram realizadas análises microestruturais qualitativas e quantitativas em amostras de seções transversais do material-base, das buchas escoadas e das buchas escoadas e roscadas.

Na caracterização e quantificação das variações microestruturais das amostras, foram empregadas as técnicas de análise metalográfica por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Na sua preparação, as amostras das buchas escoadas e das buchas escoadas e roscadas foram seccionadas ao meio, no sentido do seu eixo de simetria, por disco abrasivo. Posteriormente as amostras foram embutidas em baquelite e finalmente foram preparadas segundo os procedimentos empregados para aços de baixo carbono, ou

seja, lixamento da superfície com lixa até 600 mesh, polimento com alumina de 1 μm (norma NBR 13284) e ataque com nital a 2% (norma NBR 8108). O tempo de ataque variou segundo o grau de deformação da microestrutura de cada amostra.

4.11.1 Microscopia óptica

As áreas hachuradas da figura 62 assinalam os locais analisados nas seções transversais das amostras. As microestruturas destas áreas foram observadas utilizando-se um microscópio óptico Olympus PMG 3. As imagens das micrografias foram adquiridas digitalmente pelo programa Image Pro Plus [93,94] através de uma câmera CCD Sony DXC – 151A.

As imagens das microestruturas das regiões R1, R2, R3 e R4 sobre as áreas hachuradas da figura 62, as quais caracterizam a estrutura da borda interna da bucha escoada, foram posteriormente transferidas para o programa de análise de imagens analySIS 2.11.002, produzido pela empresa Soft-Imaging Software GmbH. As variáveis microestruturais analisadas foram o fator de forma (s) e o diâmetro dos grãos (d).

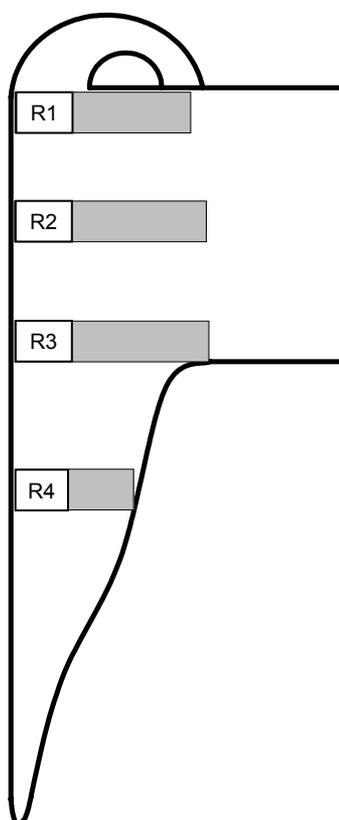


Figura 62 – Regiões analisadas por microscopia óptica na bucha escoada.

Para relacionar a região analisada (R1, R2, R3 e R4) com a respectiva amostra, adicionou-se ao código da amostra a região em questão. Por exemplo: os códigos A215R1, A215R2, A215R3 e A215R4 relacionam a amostra A215 com as quatro regiões analisadas. Este procedimento foi empregado para a identificação das regiões analisadas de todas as demais amostras.

A medição das zonas termomecanicamente afetadas (ZTA) das amostras foi realizada nas três áreas hachuradas que compreendem a espessura da chapa (R1, R2 e R3). Para realizar a medição da ZTA empregou-se um micrômetro ocular digital acoplado ao microscópio óptico.

As características técnicas dos equipamentos e programas utilizados estão descritas no anexo E.

4.11.2 Microscopia eletrônica de varredura – MEV

Esta técnica foi empregada para observação metalográfica de regiões das buchas que apresentaram alterações microestruturais mais intensas. Foi empregado o microscópio eletrônico de varredura Philips XL-30, do Laboratório de Materiais - LabMat.

4.12 Caracterização das Propriedades Mecânicas

A caracterização das propriedades mecânicas foi realizada através de ensaios de tração e de microdureza. Os ensaios de microdureza foram realizados em diferentes posições da região deformada nas buchas escoadas. Para a realização dos ensaios de tração, inicialmente foram produzidas roscas nas buchas escoadas empregando-se um macho laminador. O ensaio de tração permite determinar a carga máxima resistente e a classe de resistência da rosca de cada amostra.

4.12.1 Microdureza

Para a determinação da microdureza do material-base e das regiões deformadas das buchas escoadas foi empregado um Microdurômetro Mitutoyo MVK – E3 [95,96] e as medições foram realizadas segundo a norma NBR NM 188-1.

Material-Base: A microdureza média de cada material empregado no estudo foi determinada medindo-se a microdureza de amostras de seções transversais em três regiões distintas. Determinou-se para o material-base a microdureza Vickers HV 0,1.

Buchas Escoadas: A avaliação da microdureza das buchas escoadas foi realizada através da distribuição de pontos de medição sobre as quatro regiões onde foram analisadas as microestruturas (figura 62). Esse procedimento possibilita avaliar de maneira abrangente a área transversal das buchas escoadas além de relacionar o perfil de microdureza encontrado com a microestrutura da região em questão. Em cada uma das quatro regiões (R1, R2, R3 e R4) as medições iniciaram na borda interna do furo formado pela bucha escoada e seguiram em direção ao material-base (figura 63). O perfil da microdureza média obtido para cada região é a média aritmética de três medições realizadas. Para as buchas escoadas determinou-se a microdureza Vickers HV 0,025.

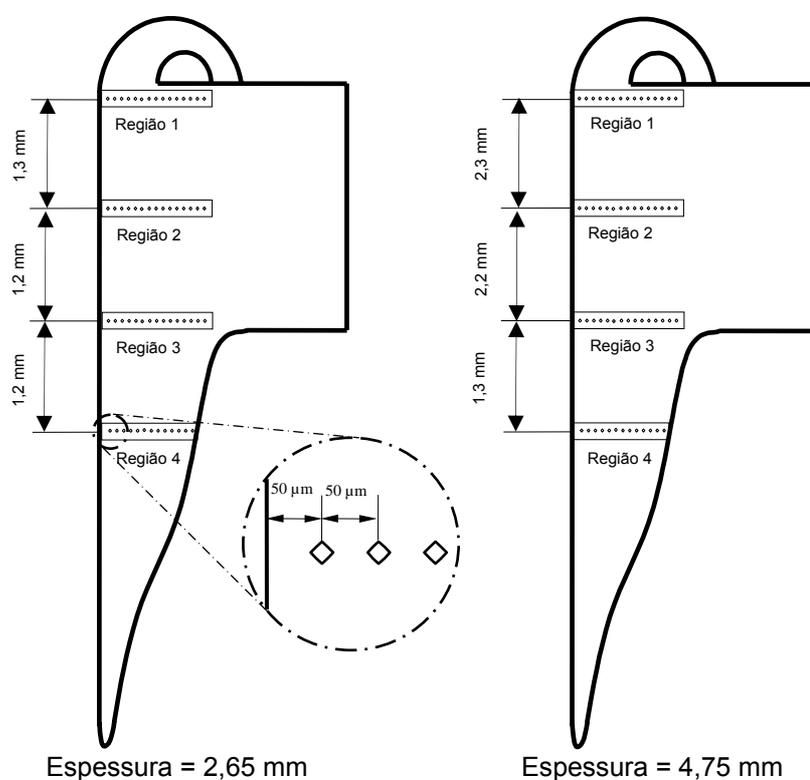


Figura 63 – Distribuição dos pontos de medição da microdureza sobre as buchas escoadas.

4.12.2 Ensaio mecânico de tração

Os ensaios para a determinação da carga de resistência máxima média, $F_{K_{Max MED}}$, e da classe de resistência da rosca das amostras, foram realizados em uma Máquina Universal de Ensaio [97]. Os dados técnicos do equipamento estão no anexo F.

Para a execução do ensaio de resistência à tração de uma bucha roscada deve-se seguir procedimento semelhante ao ensaio de tração convencional. A fixação roscada é tracionada a baixa velocidade, até a ruptura do corpo de prova, quando então a carga de resistência à tração máxima é medida. O valor da carga de resistência máxima média, $F_{K_{Max MED}}$, de cada amostra foi considerada como sendo a média aritmética dos valores máximos encontrados para três ensaios.

Os ensaios para a determinação da classe de resistência da rosca das amostras seguiram os procedimentos da norma DIN 267, parte 4, para uma rosca métrica normal M12 [48]. A norma estabelece os seguintes procedimentos:

- Aplicar a carga axialmente na rosca da bucha tracionando-se o parafuso, e então manter a carga 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. O início do movimento de retirada do parafuso pode ser auxiliado 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.

Para realizar o ensaio de tração das buchas escoadas roscadas foi empregado o dispositivo ilustrado na figura 64, que serve tanto para ensaios de medição de carga de tração máxima como para a determinação de classes de resistência.

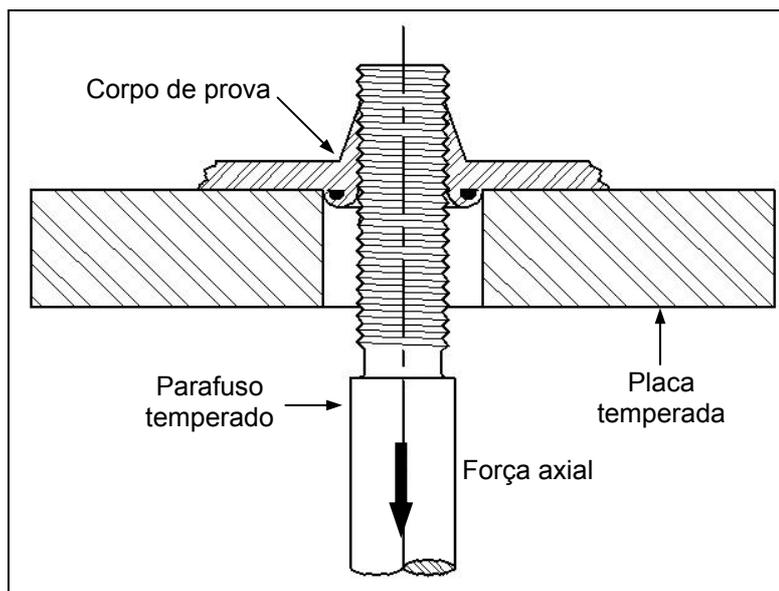


Figura 64 – Dispositivo empregado para realizar os ensaios de determinação da carga de resistência máxima média e determinação da classe de resistência da rosca.

4.13 Análise Estatística

Para apresentação e avaliação dos dados coletados nos diversos ensaios experimentais realizados foram aplicados os métodos da estatística descritiva e da estatística inferencial.

A análise e apresentação dos dados através do método da estatística descritiva ocorreram pela determinação das médias, desvios-padrões e da dispersão dos resultados, além da organização e apresentação dos dados na forma de tabelas e gráficos.

O método da inferência estatística foi aplicado, mais especificamente, na análise dos resultados da avaliação microestrutural em termos do diâmetro (d) e fator de forma (s_f) médios dos grãos das regiões. Para tanto realizou-se um delineamento experimental inteiramente ao acaso com número diferentes de repetições fazendo a interpretação dos dados através da análise de variância – ANOVA - para determinar se a média das diferentes regiões de uma mesma amostra, ou as regiões iguais de amostras diferentes apresentam valores de diâmetro e fator de forma de grãos estatisticamente diferentes. Após a análise de variância realizou-se a comparação das médias do diâmetro e do fator de forma apresentado pelos grãos. Para a determinação da existência de diferença

significativa entre duas médias foi empregado o teste Tukey, que permite estabelecer a diferença mínima significativa, ou seja, a menor diferença de médias de amostras que deve ser tomada como estatisticamente significante, em determinado nível.

O anexo G apresenta algumas tabelas de ANOVAS realizadas, e tabelas com as respectivas comparações entre as médias pelo teste Tukey.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Inicialmente, serão apresentados os resultados referentes às características do processo de furação por escoamento, em termos dos esforços máximos médios gerados e da potência média de acionamento requerida, do tempo de processo e do trabalho de conformação, e das temperaturas atingidas. Posteriormente, serão apresentados os resultados da avaliação da geometria e qualidade das buchas obtidas; as análises microestruturais das buchas escoadas e das buchas roscadas, em termos das alterações impostas ao material empregado; e a avaliação das propriedades mecânicas obtidas, em termos da microdureza, da carga máxima de resistência e da classe de resistência das buchas roscadas.

5.1 Esforços Gerados nos Ensaios

Como esforços na furação por escoamento são considerados a Força de Avanço, F_f , e o Momento Torçor, M_t , que são as solicitações mecânicas atuantes na ferramenta e na máquina-ferramenta durante a obtenção da bucha escoada. Sobre estes esforços são analisadas as influências dos parâmetros de trabalho do processo, da espessura da chapa e do teor de carbono dos materiais.

Além disso, são apresentados os resultados da potência mínima necessária à máquina-ferramenta para a obtenção das buchas escoadas para cada uma das amostras especificadas. A potência foi determinada empregando-se o procedimento descrito no item 4.9.

A tabela 8 apresenta os valores dos esforços máximos médios atingidos e da potência média necessária para a obtenção das buchas escoadas em cada amostra. Adicionalmente são apresentados os desvios-padrão, σ , dos valores obtidos.

Tabela 8 – Esforços máximos médios atingidos em cada amostra.

Amostra	Força de Avanço $F_{fMÁX.méd}$ [N]	Momento Torçor $M_{tMÁX.méd}$ [Nm]	Potência $P_{méd}$ [kW]
A215	2716,3 $\sigma = 105,12$ N	2,2 $\sigma = 0,28$ Nm	1,1 $\sigma = 0,15$ kW
A224	3241,1 $\sigma = 94,07$ N	3,5 $\sigma = 0,15$ Nm	1,5 $\sigma = 0,06$ kW
A233	3881,7 $\sigma = 38,07$ N	5,2 $\sigma = 0,15$ Nm	1,6 $\sigma = 0,05$ kW
B215	2431,3 $\sigma = 66,49$ N	2,3 $\sigma = 0,07$ Nm	1,2 $\sigma = 0,03$ kW
B224	2846,8 $\sigma = 50,84$ N	3,5 $\sigma = 0,23$ Nm	1,5 $\sigma = 0,10$ kW
B233	3222,3 $\sigma = 63,50$ N	5,3 $\sigma = 0,18$ Nm	1,6 $\sigma = 0,05$ kW
B415	2807,8 $\sigma = 105,78$ N	4,5 $\sigma = 0,13$ Nm	2,3 $\sigma = 0,08$ kW
B424	4108,5 $\sigma = 116,80$ N	6,6 $\sigma = 0,22$ Nm	2,8 $\sigma = 0,09$ kW
B433	5419,7 $\sigma = 293,77$ N	10,1 $\sigma = 0,14$ Nm	3,2 $\sigma = 0,04$ kW
C415	3106,0 $\sigma = 167,69$ N	4,3 $\sigma = 0,19$ Nm	2,3 $\sigma = 0,10$ kW
C424	4489,7 $\sigma = 150,27$ N	6,1 $\sigma = 0,09$ Nm	2,6 $\sigma = 0,04$ kW
C433	5449,3 $\sigma = 112,20$ N	8,9 $\sigma = 0,36$ Nm	2,8 $\sigma = 0,11$ kW

5.1.1 Influência dos parâmetros de trabalho

Como parâmetros de trabalho são considerados a velocidade de avanço, v_f , e a rotação, n , da ferramenta. Foi analisada a influência destes parâmetros sobre os níveis máximos médios de força de avanço e momento torçor. Considera-se como valor máximo aquele alcançado pelo processo durante a realização da bucha, desprezando-se o pico gerado durante a conformação/remoção da rebarba superior.

Percebe-se, através de análise dos dados da tabela 8, que com o aumento da velocidade de avanço e diminuição da rotação, os valores apresentados pela força de avanço e momento torçor máximos médios tendem a aumentar.

As figuras 65 e 66 apresentam as curvas de força de avanço e momento torçor das amostras A215 e A224, onde foram empregados valores de velocidade de avanço, v_f , de 100 e 200 mm/min, e rotação, n , de 5000 e 4000 min^{-1} , respectivamente. Inicialmente verifica-se que o comportamento das curvas é coerente com o comportamento da cinemática do processo para condições fixas de

processo apresentado pela literatura. Em termos de valores máximos médios, na amostra A215 a força de avanço máxima média, $F_{fMÁX.méd}$, atingiu 2716,3 N e na amostra A224 atingiu 3241,1 N, enquanto o momento torçor máximo médio, $M_{tMÁX.méd}$, alcançou os valores de 2,2 e 3,5 Nm. A potência mínima consumida para as amostras A215 e A224 foi de 1,1 kW e 1,5 kW respectivamente.

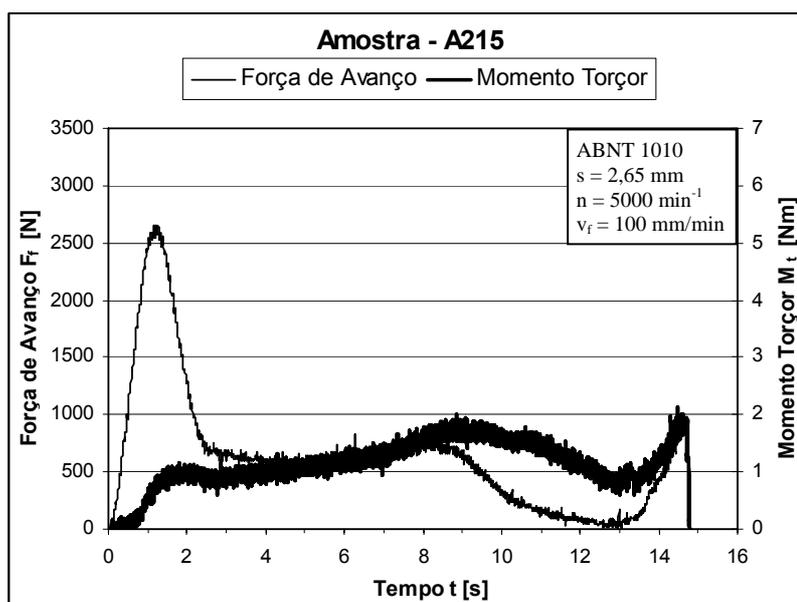


Figura 65 – Gráfico da força de avanço e do momento torçor para a amostra A215.

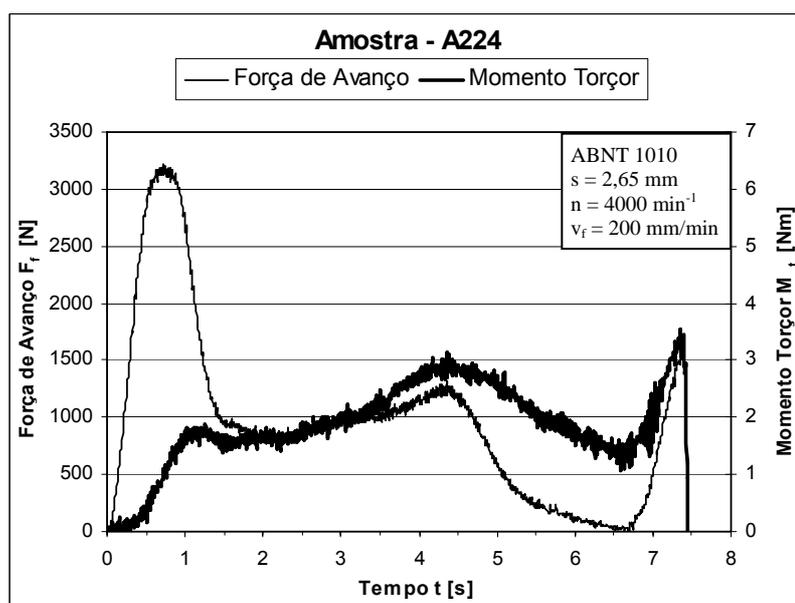


Figura 66 – Gráfico da força de avanço e do momento torçor para a amostra A224.

Dentre os valores de velocidade de avanço e rotação empregados, os maiores valores encontrados para $F_{fMÁx.méd}$, $M_{tMÁx.méd}$ e potência média necessária foram obtidos nos ensaios das amostras confeccionadas com $v_f = 300$ mm/min e $n = 3000$ min⁻¹, independente da espessura da chapa e do teor de carbono do material. Os valores individuais de $F_{fMÁx.méd}$, $M_{tMÁx.méd}$ e da potência média para estas e para as demais amostras são mostrados na tabela 8.

5.1.2 Influência da espessura do material

A alteração da espessura do material apresenta influência direta sobre os valores da força de avanço e do momento torçor gerados durante a furação por escoamento, e por conseguinte, da potência de acionamento. Esta influência ocorre no sentido de aumentar estes esforços com o aumento da espessura do material, como consequência do aumento do volume de material a ser deslocado pela ferramenta.

Esta influência pode ser percebida através da análise dos valores de $F_{fMÁx.méd}$ e $M_{tMÁx.méd}$ alcançados nas amostras B215 e B415 (figuras 67 e 68), as quais possuem o mesmo teor de carbono em sua composição química (0,04% C) e foram obtidas com as mesmas condições de ensaio ($n = 5000$ min⁻¹ e $v_f = 100$ mm/min), diferenciando-se apenas quanto a espessura da chapa. A amostra B215, com espessura de 2,65 mm, levou a valores de 2431,3 N para a $F_{fMÁx.méd}$, de 2,4 Nm para o $M_{tMÁx.méd}$ e de 1,2 kW para a potência média. Os valores máximos médios de F_f e M_t na amostra B415, com espessura 4,75 mm, foram de 2807,8 N e 4,5 Nm respectivamente, e a potência média alcançou 2,3 kW. Os valores obtidos nas demais amostras podem ser verificados na tabela 8.

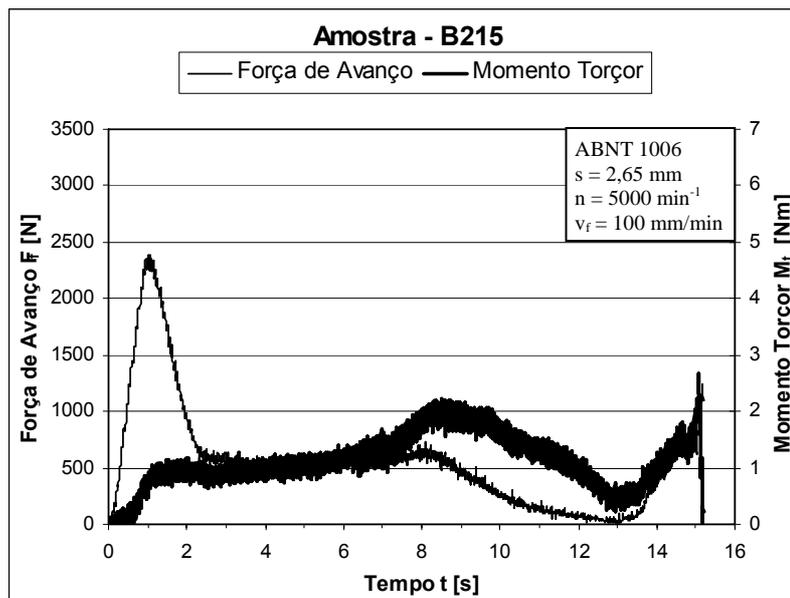


Figura 67 – Gráfico da força de avanço e do momento torçor para a amostra B215.

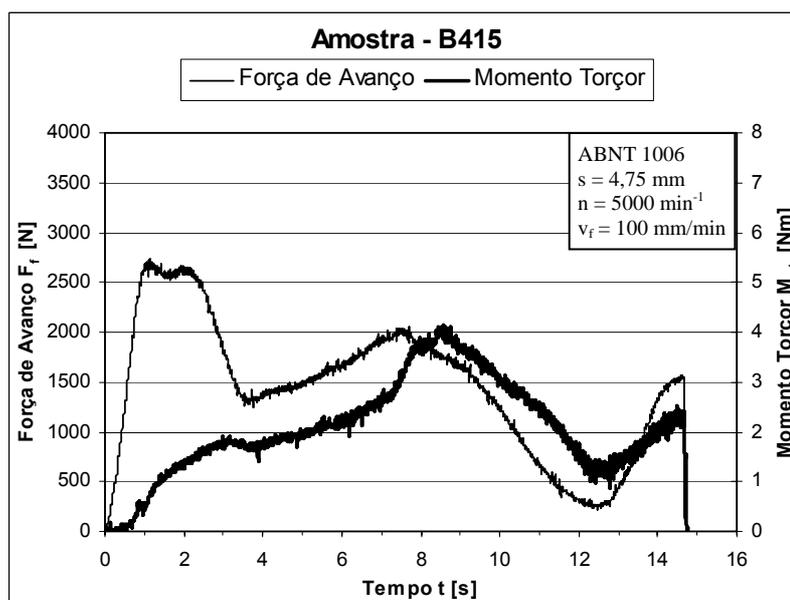


Figura 68 – Gráfico da força de avanço e do momento torçor para a amostra B415.

5.1.3 Influência do teor de carbono do material

A análise dos resultados obtidos pelas amostras demonstra que a variação do teor de carbono das chapas apresenta influência sobre os valores dos esforços gerados na obtenção das buchas escoadas, e que atua de maneira diferente sobre as suas componentes, como pode ser verificado na tabela 8.

Os valores mais elevados de força de avanço máxima média, ($F_{fMÁX.méd}$), foram obtidos nas amostras contendo os maiores teores de carbono em sua composição ou seja, nas amostras obtidas a partir de chapas contendo 0,11% e 0,13% de C. Já nas amostras contendo os menores teores de carbono (0,04% de C) o momento torçor máximo médio ($M_{tMÁX.méd}$) atingiu valores semelhantes ou mais elevados que os obtidos nas amostras com teores de carbono mais elevados.

As figuras 66 e 69 apresentam os gráficos das amostras A224 e B224 obtidas a partir de condições de trabalho idênticas, diferenciando-se apenas quanto ao teor de carbono, 0,13% e 0,04%, respectivamente. Verifica-se que a $F_{fMÁX.méd}$ obtida na amostra A224, de 3881,7 N, é maior que a obtida na amostra B224, de 3222,3 N. Para essas amostras os valores dos momentos torçores máximos médios gerados são equivalentes, atingindo o valor de 3,5 Nm. Nas amostras A233 e B233 o momento torçor apresenta valores maiores, de 5,2 Nm e 5,3 Nm, respectivamente.

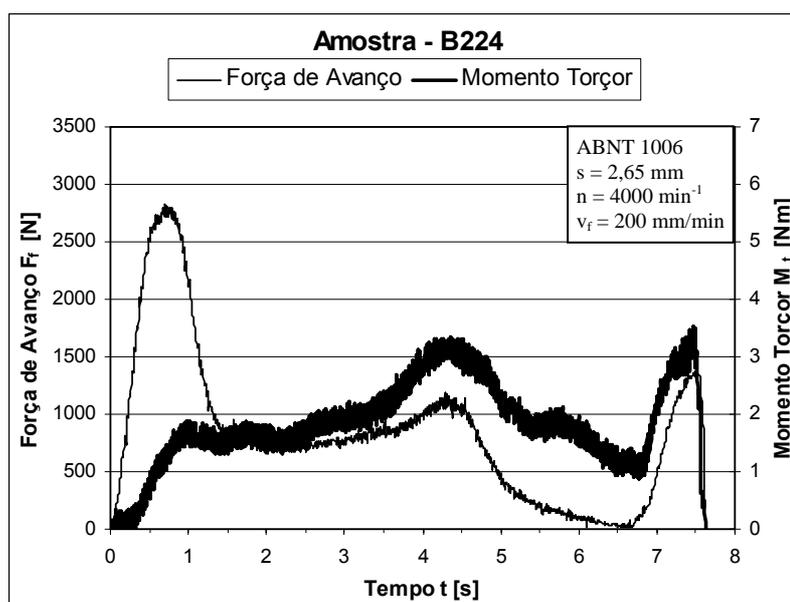


Figura 69 – Gráfico da força de avanço e do momento torçor para a amostra B224.

Essa configuração se mantém quando se comparam os valores dos esforços obtidos nas amostras B424 (0,04% C) e C424 (0,11% de C), nas figuras 70 e 71. Na amostra C424 o valor para a $F_{fMÁX.méd}$ foi de 4489,7 N e para a $M_{tMÁX.méd}$ foi de 6,1 Nm, e na amostra B424 os valores obtidos foram de 4108,5 N para a $F_{fMÁX.méd}$ e de 6,6 Nm para a $M_{tMÁX.méd}$. Esta mesma avaliação é feita para os valores da potência média necessária.

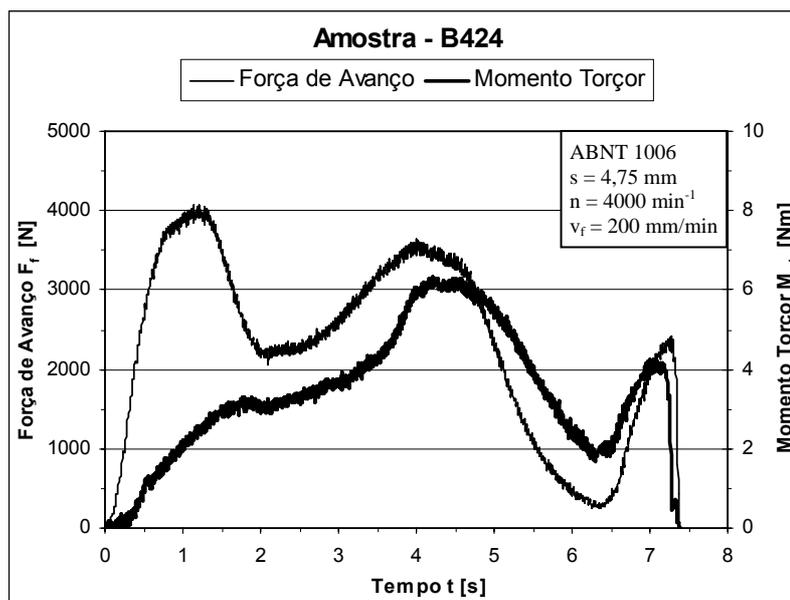


Figura 70 – Gráfico da força de avanço e do momento torçor para a amostra B424.

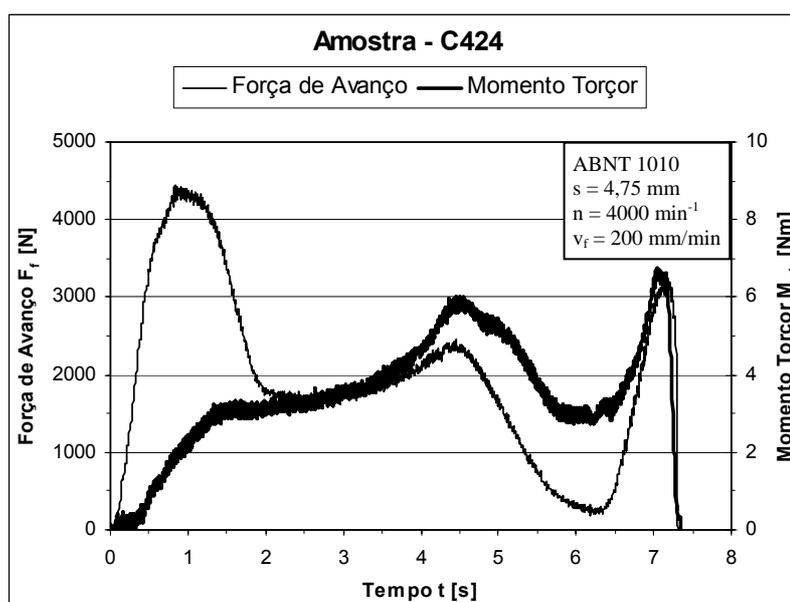


Figura 71 – Gráfico da força de avanço e do momento torçor para a amostra C424.

5.2 Tempo de Processo e Trabalho de Conformação

5.2.1 Tempo de processo

A tabela 9 apresenta os valores do tempo de processo necessário para a obtenção da bucha escoada nas diversas amostras. Verifica-se que o tempo de

processo é dependente da velocidade de avanço, v_f , empregada e do comprimento de furação, que é o deslocamento que a ferramenta realiza para obter o a bucha escoada sobre uma chapa, sendo que este varia de acordo com a espessura.

Tabela 9 – Tempo de processo para cada amostras.

Amostra	Velocidade de avanço v_f [mm/min]	Comprimento de furação [mm]	Tempo de processo t [s]
A215 B215	100	25,4	15,2
A224 B224	200		7,6
A233 B233	300		5,1
B415 C415	100	24,5	14,7
B424 C424	200		7,4
B433 C433	300		4,9

Para as amostras dos grupos A2 e B2, obtidas a partir de chapas com 2,65 mm de espessura, o comprimento de furação empregado foi de 25,4 mm. Já as amostras dos grupos B4 e C4, confeccionadas a partir de chapas mais espessas, com 4,75 mm, empregaram comprimento de furação de 24,5 mm.

Deste modo, para velocidades de avanço iguais, nas amostras com 2,65 mm de espessura os tempos de processo foram mais elevados do que nas amostras com espessura de 4,75 mm.

Como pode ser verificado na tabela 9, nas amostras A215 e B215, confeccionadas com velocidade de avanço de 100 mm/min, o tempo de processo foi o mais elevado, alcançando 15,2 segundos. Nas amostras A224 e B224, dispendeu-se 7,6 segundos de tempo de processo e foram empregadas velocidades de avanço de 200 mm/min, enquanto nas amostras A233 e B233, confeccionadas com as velocidades de avanço mais elevadas (300 mm/min), o tempo de processo atingiu apenas 5,1 segundos.

Do mesmo modo, nas amostras B415 e C415 o tempo de processo atingiu 14,7 segundos, nas amostras B424 e C424, 7,4 segundos, enquanto nas amostras B433 e C433 o tempo de processo foi de 4,9 segundos

5.2.2 Trabalho de conformação

O trabalho de conformação, ou trabalho total de conformação, W_F , que é a quantidade de energia mecânica introduzida no processo durante a confecção da bucha escoada, é composto pelo trabalho de rotação, W_R , somado ao trabalho de translação, W_T (equação 4, item 2.1.5). O trabalho de rotação, W_R , é determinado através da integração dos valores de momento torçor, em função da rotação, e o trabalho de translação, W_T , é determinado através da integração dos valores de força de avanço, em função do deslocamento, respectivamente (equação 18, item 4.9). Destes, o trabalho de rotação, W_R , contribui com a maior parcela no trabalho total, W_T , como mostrado na tabela 10 para cada amostra empregada.

Tabela 10 –Trabalho de conformação.

Amostra	Trabalho de Rotação W_R [J]	Trabalho de Translação W_T [J]	Trabalho Total de Conformação W_F [J]
A215	8.893	16	8.909
A224	5.840	24	5.864
A233	4.565	38	4.603
B215	8.952	14	8.966
B224	5.890	21	5.911
B233	4.660	30	4.690
B415	16.010	35	16.045
B424	10.543	57	10.600
B433	7.587	80	7.667
C415	16.400	36	16.436
C424	10.775	48	10.823
C433	8.053	66	8.119

a) Influência dos parâmetros de entrada

Com o aumento da rotação e diminuição da velocidade de avanço, os valores do trabalho de rotação, W_R , e do trabalho total de conformação, W_F , aumentaram, enquanto os valores do trabalho de translação, W_T , diminuíram. Isto pode ser observado comparando-se os resultados obtidos nas amostras A215 ($v_f = 100$ mm/min e $n = 5000$ min⁻¹) e A233 ($v_f = 300$ mm/min e $n = 3000$ min⁻¹),

confeccionadas a partir do mesmo material ($s = 2,65$ mm, 0,13% de C). Para a amostra A215 o trabalho de rotação, W_R , atingiu 8.893 J, o trabalho de translação, W_T , 16 J, e o trabalho total de conformação, W_F , 8909 J. Já para a amostra A233 o trabalho de rotação, W_R , atingiu 4.565 J, o trabalho de translação, W_T , 38 J, e o trabalho total de conformação, W_F , 4.603 J.

b) Influência da espessura do material

Analisando-se os resultados dos trabalhos de rotação, de translação e total de conformação obtidos nas amostras confeccionadas a partir de materiais com mesmo teor de carbono e idênticos parâmetros de entrada, percebe-se que os valores mais elevados foram obtidos nas amostras de maior espessura. Por exemplo, na amostra B215 ($v_f = 100$ mm/min, $n = 5000$ min⁻¹, 0,04% de C), obtida de chapa com espessura $s = 2,65$ mm, o trabalho de rotação, W_R , atingiu 8.952 J, o trabalho de translação, W_T , 14 J, e o trabalho total de conformação, W_F , 8.966 J. Já na amostra B415 ($v_f = 100$ mm/min, $n = 5000$ min⁻¹, 0,04% de C), obtida de chapa de espessura $s = 4,75$ mm, o trabalho de rotação, W_R , atingiu 16.010 J, o trabalho de translação, W_T , 35 J, e o trabalho total de conformação, W_F , 16.045 J.

c) Influência do teor de carbono

Para as amostras obtidas de chapas com espessura de 2,65 mm, aquelas contendo maior teor de carbono atingiram valores mais elevados para o trabalho de translação, e valores inferiores para o trabalho de rotação e trabalho total quando comparados com os valores obtidos nas amostras de menor teor de carbono. Para a amostra B224 (0,04% de C) o trabalho de rotação, W_R , foi de 5.890 J, o trabalho de translação, W_T , de 21 J e total de conformação, W_F , de 5.911 J, enquanto na amostra A224 (0,13% de C) os valores para o trabalho de rotação, W_R , foi de 5.840 J, de translação, W_T , de 24 J, e total de conformação, W_F , de 5.864 J.

No caso das amostras obtidas a partir de material com espessura de 4,75 mm, o comportamento foi inverso, ou seja, o trabalho de translação atingiu valores mais elevados nas amostras contendo menor teor de carbono, e valores menores para o trabalho de rotação e trabalho total nas amostras contendo maior teor de carbono. Comparando-se as amostras C424 (0,11% de C) e B424 (0,04% de C) verifica-se que na primeira o trabalho de rotação, W_R , foi de 10.775 J, de translação, W_T , de 48 J e total de conformação, W_F , de 10.823 J, enquanto na segunda o

trabalho de rotação, W_R , foi de 10.543 J, de translação, W_T , de 57 J e total de conformação, W_F , de 10.600 J.

5.3 Temperaturas Desenvolvidas

A seguir são apresentados os valores atingidos pela temperatura durante a obtenção das buchas escoadas nas diversas amostras. Na tabela 11 podem ser visualizados os valores da temperatura máxima média, $T_{MÁXméd}$, do gradiente de aquecimento médio, $\Delta T_{AQUECméd}$ e, ainda, os valores do gradiente de resfriamento médio, $\Delta T_{RESFméd}$.

Durante a execução da furação o perfil das curvas de temperatura apresentou nítidas alterações de comportamento no período que compreende o aquecimento inicial do material e a temperatura máxima. Neste intervalo de tempo percebe-se a existência de patamares que indicam a ocorrência de mudanças no gradiente de aquecimento. Em função disso, determinou-se o gradiente de aquecimento em dois momentos diferentes durante esse período: um que compreende as temperaturas até 650°C ($\Delta T1_{AQUECméd}$), e outro de 650°C até a temperatura máxima ($\Delta T2_{AQUECméd}$). Considerou-se como referência a temperatura de 650°C em função de esta ser a menor temperatura atingida nos ensaios onde se percebe alteração no comportamento do gradiente de aquecimento, padronizando-a para todas as amostras.

Os gradientes de resfriamento médio, $\Delta T_{RESFméd}$, foram calculados a partir da temperatura máxima média até a temperatura de referência de 400°C.

São apresentadas as influências dos parâmetros de trabalho, da espessura da chapa e do teor de carbono do material sobre os valores de temperatura alcançados.

Tabela 11 – Temperaturas máximas médias e gradientes de aquecimento e resfriamento atingidos nas amostras.

Amostra	Temperatura Máxima Média $T_{MÁX.méd}$ [°C]	Gradiente de Aquecimento Médio $\Delta T_{AQUEC.méd}$ [°C/s]		Gradiente de Resfriamento Médio $\Delta T_{RESF.méd}$ [°C/s]
		$\Delta T1_{AQUEC.méd}$ até 650°C	$\Delta T2_{AQUEC.méd}$ de 650°C até $T_{MÁX.méd}$	de $T_{MÁX.méd}$ até 400°C
A215	969 $\sigma = 21,92^\circ\text{C}$	291 $\sigma = 5,82^\circ\text{C/s}$	30 $\sigma = 0,19^\circ\text{C/s}$	61 $\sigma = 6,45^\circ\text{C/s}$
A224	902 $\sigma = 1,22^\circ\text{C}$	494 $\sigma = 48,61^\circ\text{C/s}$	56 $\sigma = 1,73^\circ\text{C/s}$	86 $\sigma = 0,10^\circ\text{C/s}$
A233	832 $\sigma = 8,27^\circ\text{C}$	397 $\sigma = 7,61^\circ\text{C/s}$	71 $\sigma = 0,83^\circ\text{C/s}$	106 $\sigma = 0,57^\circ\text{C/s}$
B215	961 $\sigma = 12,42^\circ\text{C}$	280 $\sigma = 9,02^\circ\text{C/s}$	29 $\sigma = 0,35^\circ\text{C/s}$	74 $\sigma = 0,90^\circ\text{C/s}$
B224	901 $\sigma = 0,10^\circ\text{C}$	468 $\sigma = 3,60^\circ\text{C/s}$	52 $\sigma = 1,32^\circ\text{C/s}$	99 $\sigma = 1,1890^\circ\text{C/s}$
B233	847 $\sigma = 6,03^\circ\text{C}$	445 $\sigma = 22,71^\circ\text{C/s}$	71 $\sigma = 1,42^\circ\text{C/s}$	128 $\sigma = 2,87^\circ\text{C/s}$
B415	1086 $\sigma = 41,37^\circ\text{C}$	225 $\sigma = 9,44^\circ\text{C/s}$	56 $\sigma = 2,00^\circ\text{C/s}$	74 $\sigma = 3,79^\circ\text{C/s}$
B424	1042 $\sigma = 14,15^\circ\text{C}$	343 $\sigma = 31,28^\circ\text{C/s}$	85 $\sigma = 4,81^\circ\text{C/s}$	103 $\sigma = 3,42^\circ\text{C/s}$
B433	1018 $\sigma = 6,23^\circ\text{C}$	478 $\sigma = 2,61^\circ\text{C/s}$	116 $\sigma = 1,78^\circ\text{C/s}$	123 $\sigma = 1,59^\circ\text{C/s}$
C415	1073 $\sigma = 26,32^\circ\text{C}$	219 $\sigma = 5,23^\circ\text{C/s}$	59 $\sigma = 0,21^\circ\text{C/s}$	63 $\sigma = 0,10^\circ\text{C/s}$
C424	1018 $\sigma = 0,67^\circ\text{C}$	386 $\sigma = 0,25^\circ\text{C/s}$	77 $\sigma = 0,19^\circ\text{C/s}$	89 $\sigma = 1,30^\circ\text{C/s}$
C433	921 $\sigma = 8,80^\circ\text{C}$	460 $\sigma = 28,05^\circ\text{C/s}$	83 $\sigma = 1,83^\circ\text{C/s}$	104 $\sigma = 2,66^\circ\text{C/s}$

5.3.1 Influência dos parâmetros de trabalho

A partir dos valores constantes na tabela 11, é possível analisar a influência dos parâmetros de trabalho empregados sobre a temperatura e gradientes de aquecimento e resfriamento desenvolvidos nas amostras. Os aumentos da rotação combinados com a diminuição da velocidade de avanço da ferramenta elevam as temperaturas máximas, mas, em contrapartida, diminuem os gradientes de aquecimento e resfriamento. Nas figuras 72 e 73 são mostrados os resultados para as amostras A233 e A215, os quais confirmam essa tendência.

Para a amostra A233 ($n = 3000 \text{ min}^{-1}$ e $v_f = 300 \text{ mm/min}$) a temperatura máxima média, $T_{MÁX.méd}$, foi de 832°C , enquanto para a amostra A215 ($n = 5000 \text{ min}^{-1}$ e $v_f = 100 \text{ mm/min}$) a temperatura máxima média, $T_{MÁX.méd}$, atingiu 969°C .

Contrariamente à temperatura máxima, os valores dos gradientes de aquecimento e de resfriamento diminuem seus valores quando se empregam velocidades de avanço pequenas e rotações elevadas.

Na amostra A215 os gradientes de aquecimento médio, $\Delta T_{1\text{AQUEC.méd}}$ e $\Delta T_{2\text{AQUEC.méd}}$, atingiram 291°C/s e 30°C/s , respectivamente, enquanto na amostra A233 os valores para estes gradientes foram de 397°C/s e 71°C/s . Para o gradiente de resfriamento médio, $\Delta T_{\text{RESF.méd}}$, os valores atingidos nas amostras A215 e A233 foram de 61°C/s e 106°C/s , respectivamente.

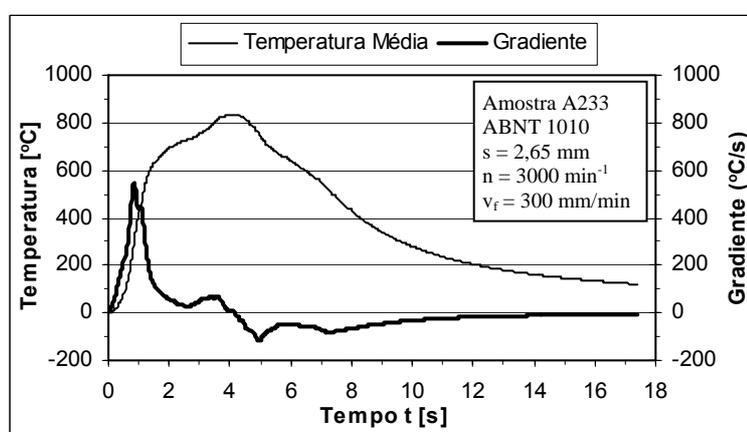


Figura 72 – Gráfico da temperatura e do gradiente de temperatura para a amostra A233.

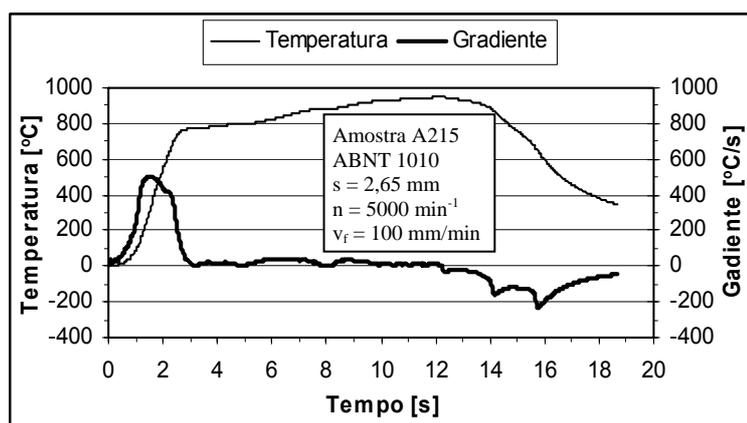


Figura 73 – Gráfico da temperatura e do gradiente de temperatura para a amostra A215.

Independente do teor de carbono e da espessura da chapa, os maiores valores de temperatura máxima média, $T_{\text{MÁX.méd}}$, encontrados foram obtidos nas amostras que empregaram as rotações mais elevadas ($n = 5000 \text{ min}^{-1}$) e as menores velocidade de avanço ($v_f = 100 \text{ mm/min}$). Os maiores valores para os

gradientes de aquecimento médio, $\Delta T_{1\text{AQUEC.méd}}$, e, $\Delta T_{2\text{AQUEC.méd}}$, e gradiente de resfriamento médio, $\Delta T_{\text{RESF.méd}}$, foram obtidos nas amostras confeccionadas com as velocidade de avanço mais elevadas ($v_f = 300 \text{ mm/min}$) e com as menores rotações ($n = 3000 \text{ min}^{-1}$). Como exceções a esse comportamento citam-se as amostras A224 e B224 que apresentaram valores de gradientes de aquecimento médio, $\Delta T_{1\text{AQUEC.méd}}$, maiores que as amostras de seus grupos.

5.3.2 Influência da espessura do material

Os valores de temperaturas máximas médias obtidos nas amostras durante a obtenção da bucha escoada evidenciam a influência da variação da espessura do material. Comparando-se os valores percebe-se que nas amostras com maior espessura as temperaturas máximas médias atingiram valores mais elevadas.

As figuras 74 e 75 apresentam as curvas de temperatura das amostras B233 e B433, respectivamente. Estas amostras possuem o mesmo teor de carbono em sua composição química (0,04% C) e foram obtidas a partir das mesmas condições de conformação ($n = 3000 \text{ min}^{-1}$ e $v_f = 300 \text{ mm/min}$), diferenciando-se apenas pelo valor da espessura da chapa.

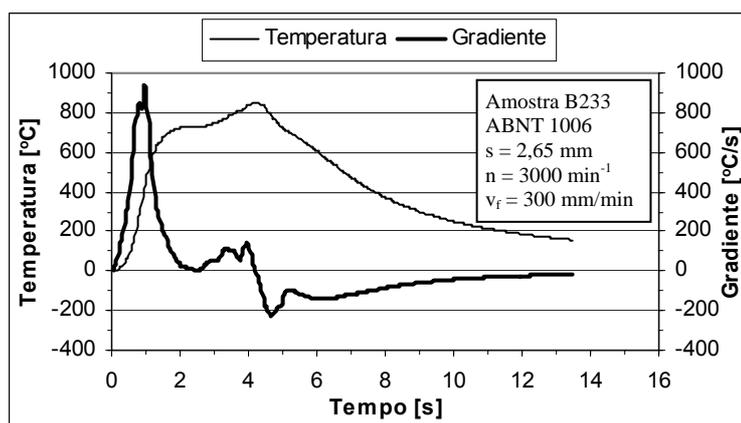


Figura 74 – Gráfico da temperatura e do gradiente de temperatura para a amostra B233.

Como pode ser observado, o valor da $T_{\text{MÁX.méd}}$ atingiu 847°C na amostra B233 (espessura de 2,65 mm), enquanto na amostra B433 (espessura de 4,75 mm) foi de 1018°C . Os valores obtidos nas demais amostras podem ser verificados na tabela 11.

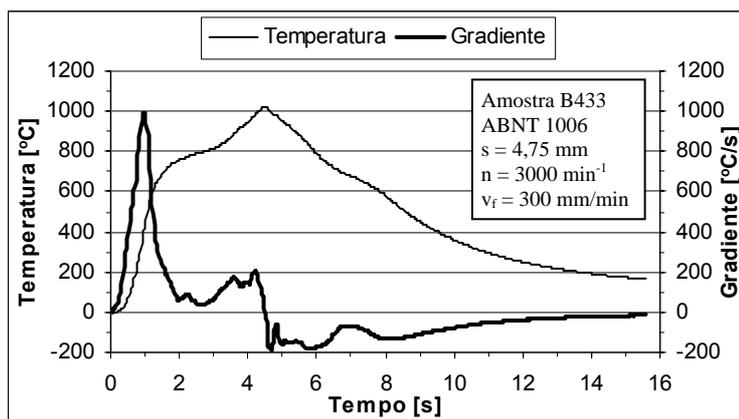


Figura 75 – Gráfico da temperatura e do gradiente de temperatura para a amostra B433.

Os gradientes médios de aquecimento, $\Delta T_{1\text{AQUEC.méd}}$ e $\Delta T_{2\text{AQUEC.méd}}$, e o de resfriamento, $\Delta T_{\text{RESF.méd}}$, para a amostra B233 atingiram os valores de 445°C/s, 71°C/s e 128°C/s, respectivamente, enquanto para a amostra B433 foram de 478°C/s, 116°C/s e 123°C/s.

5.3.3 Influência do teor de carbono do material

Comparativamente, verifica-se que a variação do teor de carbono das amostras não apresenta influência significativa na geração de calor quando são consideradas as dispersões dos valores atingidos pelas temperaturas máximas médias. Apesar disso, percebe-se que os valores mais elevados de temperaturas máximas médias e de gradientes de resfriamento foram obtidos nas amostras que possuem os menores teores de carbono (0,04% de C) e que foram conformadas com as menores rotações e com as maiores velocidades de avanço, enquanto que os valores dos gradientes de aquecimento não apresentaram comportamento definido.

As figuras 76 e 77 apresentam os gráficos das amostras B424 e C424 cujos teores de carbono são 0,04% e 0,11%, respectivamente. Na amostra B424 a temperatura máxima média $T_{\text{MÁX.méd}}$ foi de 1042°C, enquanto que na amostra C424 atingiu um valor menor, de 1018°C. Os gradientes de aquecimento médio $\Delta T_{1\text{AQUEC.méd}}$ e $\Delta T_{2\text{AQUEC.méd}}$ atingiram 343 e 85°C/s, respectivamente, para a amostra B424, e alcançaram os valores de 386 e 77°C/s para a amostra C424. Os gradientes de resfriamento $\Delta T_{\text{RESF.méd}}$ para as amostras B424 e C424 alcançaram

valores de 103°C/s e de 89°C/s , respectivamente.

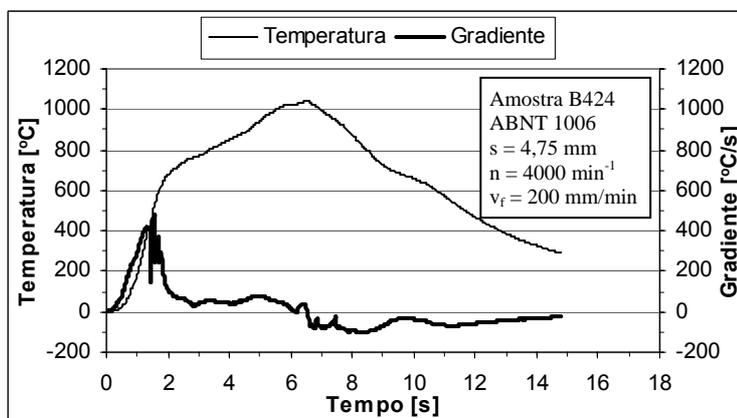


Figura 76 – Gráfico da temperatura e do gradiente de temperatura para a amostra B424.

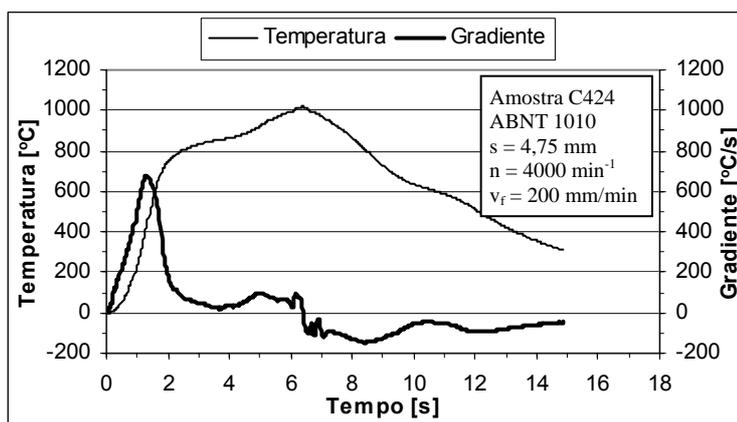


Figura 77 – Gráfico da temperatura e do gradiente de temperatura para a amostra C424.

5.4 Geometria e Qualidade da Bucha Escoda

A tabela 12 apresenta, para todas as amostras, os resultados da geometria da bucha em termos da espessura da parede, e_p , e do comprimento da bucha, ℓ , e a classificação da qualidade da rebarba inferior.

A qualidade da rebarba de todas as amostras foi classificada como do Grupo I, apresentando rebarba com rupturas abaixo de 10% do seu comprimento. Essa classificação demonstra que os parâmetros de trabalho, a espessura da chapa e o teor de carbono não apresentaram influência significativa sobre a qualidade das rebarbas.

Tabela 12 – Dimensões médias e qualidade das buchas escoadas.

Amostra	Espessura e_p [mm]	Comprimento ℓ [mm]	Qualidade da Rebarba
A215	1,34	7,28	Grupo I
A224	1,36	6,46	Grupo I
A233	1,44	6,22	Grupo I
B215	1,32	7,16	Grupo I
B224	1,38	6,86	Grupo I
B233	1,48	5,98	Grupo I
B415	1,86	7,94	Grupo I
B424	1,98	7,36	Grupo I
B433	2,10	6,80	Grupo I
C415	1,92	7,76	Grupo I
C424	1,96	7,40	Grupo I
C433	2,04	6,98	Grupo I

5.4.1 Influência dos parâmetros de trabalho

Comparando-se os resultados verifica-se que os parâmetros de trabalho influenciam os valores da espessura da parede e do comprimento da bucha.

Esta influência, para a espessura de parede, se dá no sentido de aumentar suas dimensões com o aumento da velocidade de avanço e diminuição da rotação. Isto pode ser percebido comparando-se as amostras A215 e A233, as quais possuem a mesma espessura ($s = 2,65$ mm) e igual teor de carbono (0,13% C), diferenciando apenas nos parâmetros de ensaio. Na amostra A215 ($v_f = 100$ mm/min e $n = 5000$ min⁻¹), a espessura de parede atingiu o valor de 1,34 mm, enquanto na amostra A233 ($v_f = 300$ mm/min e $n = 3000$ min⁻¹), essa variável atingiu 1,44 mm.

Os valores do comprimento da bucha são influenciados de maneira inversa pelos parâmetros de trabalho, isto é, com o aumento da velocidade de avanço e diminuição da rotação, o comprimento da bucha tende a diminuir. Este comportamento é percebido na análise dos resultados apresentados pelas amostras B215 e B233, obtidas de mesmo material ($s = 2,65$ mm e 0,04% de C), alterando-se apenas os parâmetros de trabalho. Para a amostra B215 ($v_f = 100$ mm/min e $n = 5000$ min⁻¹) o comprimento de bucha obtido foi de 7,16 mm, enquanto para a

amostra B233 ($v_f = 300$ mm/min e $n = 3000$ min⁻¹) o comprimento da bucha apresentou 5,98 mm.

Nas demais amostras confeccionadas com espessuras de material e/ou teores de carbono diferentes, a espessura de parede, e_p , e o comprimento de bucha, ℓ , apresentaram os mesmos comportamentos quanto à influência dos parâmetros de trabalho, conforme tabela 12.

5.4.2 Influência da espessura do material

Os valores da espessura da parede e do comprimento da bucha são influenciados pela alteração da espessura do material. Verifica-se que, quando são empregados iguais parâmetros de trabalho e chapas com mesmo teor de carbono, quanto maior for a espessura da chapa, mais espessas são as paredes e mais longas são as buchas escoadas formadas. Na amostra B224 (espessura de material $s = 2,65$ mm), a espessura de parede foi de 1,38 mm e o comprimento de 6,86 mm, enquanto na amostra B424 (espessura de material $s = 4,75$ mm), a espessura de parede obtida foi de 1,98 mm e o comprimento de 7,36 mm.

5.4.3 Influência do teor de carbono do material

Analisando-se os resultados da geometria das buchas, verifica-se que as dimensões não apresentam um comportamento conclusivo com a variação do teor de carbono do material.

De maneira geral, para as amostras obtidas a partir de chapas de mesma espessura e mesmos parâmetros de trabalho, aquelas com material contendo menor teor de carbono (0,04%) apresentaram buchas com maior espessura de parede, e aquelas com material contendo maiores teores de carbono (0,11 e 0,13%) apresentaram buchas mais longas.

Esse comportamento pode ser percebido analisando-se os valores de espessura de parede e comprimento obtidos nas amostras A233 e B233. Essas amostras possuem a mesma espessura ($s = 2,65$ mm) e foram obtidas com os mesmos parâmetros de trabalho ($v_f = 300$ mm/min, $n = 3000$ min⁻¹). A espessura de parede e o comprimento de bucha na amostra A233 (0,13% de C) atingiram os valores de 1,44 mm e de 6,22 mm, respectivamente. Na amostra B233 (0,04% de C)

esses valores foram de 1,48 mm e de 5,98 mm. Esse mesmo comportamento se mantém quando se comparam as amostras C433 e B433, que possuem espessura de 4,75 mm.

5.5 Análise Micrográfica das Buchas Escoadas

As amostras foram avaliadas microscopicamente com o objetivo de determinar as alterações microestruturais impostas ao material pelo processo de furação por escoamento. O processo altera a microestrutura original em diferentes faixas concêntricas ao centro da bucha escoada caracterizando uma zona termomecanicamente afetada. As faixas variam sua largura dependendo dos parâmetros de entrada do processo (velocidade de avanço e rotação), da espessura e do teor de carbono do material empregado.

Em função das mudanças ocorridas na microestrutura puderam ser definidas duas faixas nos corpos de prova, conforme mostrado na figura 78. Estas faixas apresentam as seguintes diferenças principais:

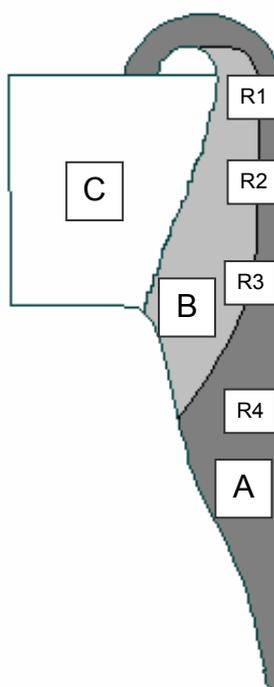


Figura 78 – Zona termomecanicamente afetada. A – faixa mais afetada. B – faixa intermediária. C – metal-base.

- Faixa A: onde ocorrem as maiores alterações na microestrutura do material. De uma maneira geral, ocorre refino de grão em toda a extensão da região deformada, sendo que o maior refino se situa próximo à borda do furo da bucha na região que compreende a espessura da chapa, ocorrendo um aumento gradual do diâmetro dos grãos em direção a faixa B. A perlita aparece uniformemente distribuída em toda a estrutura. A faixa A se estende desde a rebarba superior até a rebarba inferior da bucha escoada, onde podem ser visualizados grãos aciculares, inclusive com formação de ferrita de Widmanstätten.
- Faixa B: faixa intermediária onde ocorre um menor refino de grão quando comparado com a faixa A. Aparecem regiões heterogêneas compostas por grãos refinados e grãos maiores de tamanho heterogêneo, que aumentam seu diâmetro em direção à faixa C. Há uma tendência, em algumas amostras, de formação de uma estrutura bandeada, outras apresentam alinhamento dos grãos na direção de maior deformação e ainda, em outras, um bandeamento e alinhamento de grãos grosseiros e finos. A faixa B é mais interna e menos longa que a faixa A, normalmente ocupando parte da rebarba superior e parte da rebarba inferior (junto à superfície inferior da chapa).

A faixa C corresponde à microestrutura original do material-base das amostras que se apresenta na forma típica de um aço ferrítico-perlítico laminado a quente.

As análises dos tamanhos e fator de forma dos grãos apresentada pelas microestruturas das amostras se concentraram na faixa A da zona termomecanicamente afetada, junto à borda do furo da bucha. Também se determinou a largura apresentada pelas faixas A e B, que somadas compõem a ZTA total.

As tabelas 13 a 16 apresentam os valores médios para o diâmetro, d , e fator de forma, s_f , dos grãos das regiões analisadas sobre a faixa A, além da largura da zona termomecanicamente afetada (ZTA) nas faixas A e B sobre as regiões R1, R2 e R3 indicadas na figura 78 (ver também item 4.11.1), e ainda a ZTA total de todas as amostras.

Tabela 13 – Valores médios de diâmetro, fator de forma dos grãos e largura da zona termomecanicamente afetada das amostras A215, A224 e A233.

Amostra	Diâmetro Médio (d) [μm]	Fator de Forma Médio (s _f)	ZTA Faixa A [μm]	ZTA Faixa B [μm]	ZTA Total [μm]
A215R1	5,74	0,67	65	870	935
A215R2	5,81	0,65	45	960	1005
A215R3	5,98	0,61	45	1345	1390
A215R4	6,48	0,60			
A224R1	5,07	0,69	110	740	850
A224R2	4,31	0,69	130	690	820
A224R3	6,38	0,64	65	1085	1150
A224R4	6,44	0,60			
A233R1	3,93	0,70	130	780	910
A233R2	4,30	0,69	110	585	695
A233R3	5,47	0,65	65	1020	1085
A233R4	6,64	0,59			

Tabela 14 – Valores médios de diâmetro, fator de forma dos grãos e largura da zona termomecanicamente afetada das amostras B215, B224 e B233.

Amostra	Diâmetro Médio (d) [μm]	Fator de Forma Médio (s _f)	ZTA Faixa A [μm]	ZTA Faixa B [μm]	ZTA Total [μm]
B215R1	8,82	0,70	65	720	785
B215R2	7,93	0,69	45	890	935
B215R3	8,78	0,65	45	1130	1175
B215R4	10,70	0,65			
B224R1	7,76	0,70	65	915	980
B224R2	6,66	0,70	45	870	915
B224R3	8,40	0,66	25	1175	1200
B224R4	8,71	0,68			
B233R1	5,47	0,71	110	520	630
B233R2	4,77	0,70	65	520	585
B233R3	7,40	0,69	65	1045	1110
B233R4	8,74	0,68			

Tabela 15 – Valores médios de diâmetro, fator de forma dos grãos e largura da zona termomecanicamente afetada das amostras B415, B424 e B433.

Amostra	Diâmetro Médio (d) [μm]	Fator de Forma Médio (s _f)	ZTA Faixa A [μm]	ZTA Faixa B [μm]	ZTA Total [μm]
B415R1	9,36	0,66	45	1220	1265
B415R2	6,88	0,65	30	805	835
B415R3	8,66	0,65	25	1480	1505
B415R4	8,48	0,63			
B424R1	7,80	0,70	85	1220	1305
B424R2	5,76	0,71	110	980	1090
B424R3	11,32	0,66	65	1200	1265
B424R4	11,09	0,65			
B433R1	5,05	0,63	220	1150	1370
B433R2	5,51	0,63	175	650	825
B433R3	12,06	0,57	45	1480	1525
B433R4	11,67	0,59			

Tabela 16 – Valores médios de diâmetro, fator de forma dos grãos e largura da zona termomecanicamente afetada das amostras C415, C424 e C433.

Amostra	Diâmetro Médio (d) [μm]	Fator de Forma Médio (s _f)	ZTA Faixa A [μm]	ZTA Faixa B [μm]	ZTA Total [μm]
C415R1	10,75	0,60	65	1560	1625
C415R2	10,43	0,60	45	1240	1285
C415R3	10,31	0,47	---	1650	1650
C415R4	10,44	0,48			
C424R1	7,90	0,63	65	1350	1415
C424R2	6,76	0,61	45	1195	1240
C424R3	10,95	0,47	---	1600	1600
C424R4	10,44	0,44			
C433R1	5,03	0,65	260	1260	1520
C433R2	6,13	0,62	110	825	935
C433R3	9,74	0,59	65	1480	1545
C433R4	9,69	0,49			

Para melhor visualização das alterações microestruturais dos materiais-base das amostras ocasionadas pelo processo, as micrografias representativas de cada faixa concêntrica foram identificadas nas figuras. Deste modo, as micrografias C1 referem-se às microestruturas dos materiais-base das amostras. Sobre a faixa A foram mostradas as micrografias A1, que ilustram as alterações das regiões superiores R1 e R2, e as micrografias A2, que se referem às alterações das regiões inferiores R3 e R4. As micrografias B1 referem-se às microestruturas encontradas na faixa intermediária B.

5.5.1 Influência dos parâmetros de entrada

Os parâmetros de entrada – velocidade de avanço e rotação – influenciaram a microestrutura original do material das amostras. Para a faixa A de amostras confeccionadas a partir de material contendo igual teor de carbono e espessura percebe-se que o diâmetro médio dos grãos diminui com o aumento da velocidade de avanço e diminuição da rotação, quando se comparam as mesmas regiões de amostras diferentes. Nestas condições, o fator de forma dos grãos tem a tendência de diminuir o seu valor, alterando de equiaxiais na região superior da bucha, para aciculares na rebarba inferior.

De maneira geral, a região próxima à borda do furo da bucha apresenta tamanho de grão inferior ou no máximo igual à região mais interna para todos os parâmetros de trabalho empregados.

Na faixa intermediária B, para velocidade de avanço maior e rotação menor, aparecem estruturas refinadas que se apresentam homogeneamente distribuídas sobre a região superior. Para condições de deformações que envolvem velocidades de avanço menores e rotações maiores os grãos se apresentam com maiores dimensões.

As figuras 79 e 80 apresentam as micrografias das amostras A215 e A233 confeccionadas a partir de mesmo material-base (0,13% C, espessura = 2,65 mm), com valores de velocidade de avanço, v_f , de 100 e 300 mm/min, e rotação, n , de 5000 e 3000 min^{-1} , respectivamente.

As micrografias C1 se referem ao material-base dessas amostras que apresentam diâmetro de grão e fator de forma médios de 14,6 μm e de 0,62, respectivamente.

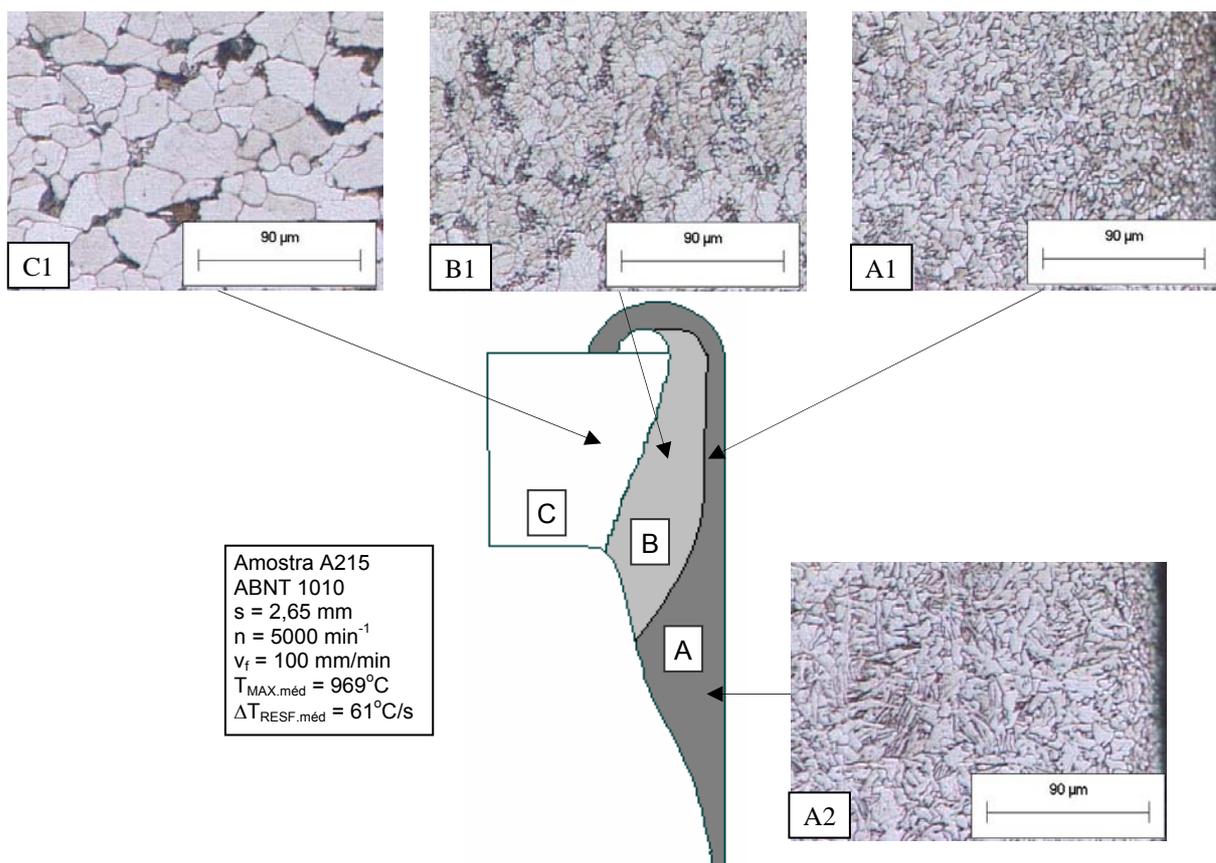


Figura 79 – Micrografias ópticas das regiões da amostra A215.

As micrografias A1 mostram uma região de intenso refino dos grãos junto à borda interna do furo da bucha, onde os grãos se apresentam com formato equiaxial. Nesta região os valores médios para as amostras são diferentes tanto para o diâmetro quanto para o fator de forma dos grãos. O diâmetro médio dos grãos na amostra A215 é igual a $5,74 \mu\text{m}$ e o fator de forma médio igual a $0,67$, enquanto na amostra A233 aparece um maior refino de grão, onde os valores do diâmetro e do fator de forma médios são de $3,93 \mu\text{m}$ e $0,70$, respectivamente.

As micrografias A2 das amostras, referentes à rebarba inferior da bucha escoada, mostram uma estrutura refinada de grãos com diâmetro médio de $6,48 \mu\text{m}$ e fator de forma médio de $0,60$ para a amostra A215 e $6,64 \mu\text{m}$ e $0,59$ para a A233. O diâmetro e o fator de forma médios destas amostras são semelhantes.

As micrografias B1 apresentaram estruturas heterogêneas compostas por grãos grosseiros e grãos refinados distribuídos pela matriz ferrítica. Percebe-se que essa região, na amostra A215, apresenta estrutura com maior porcentagem de grãos refinados do que na amostra A233.

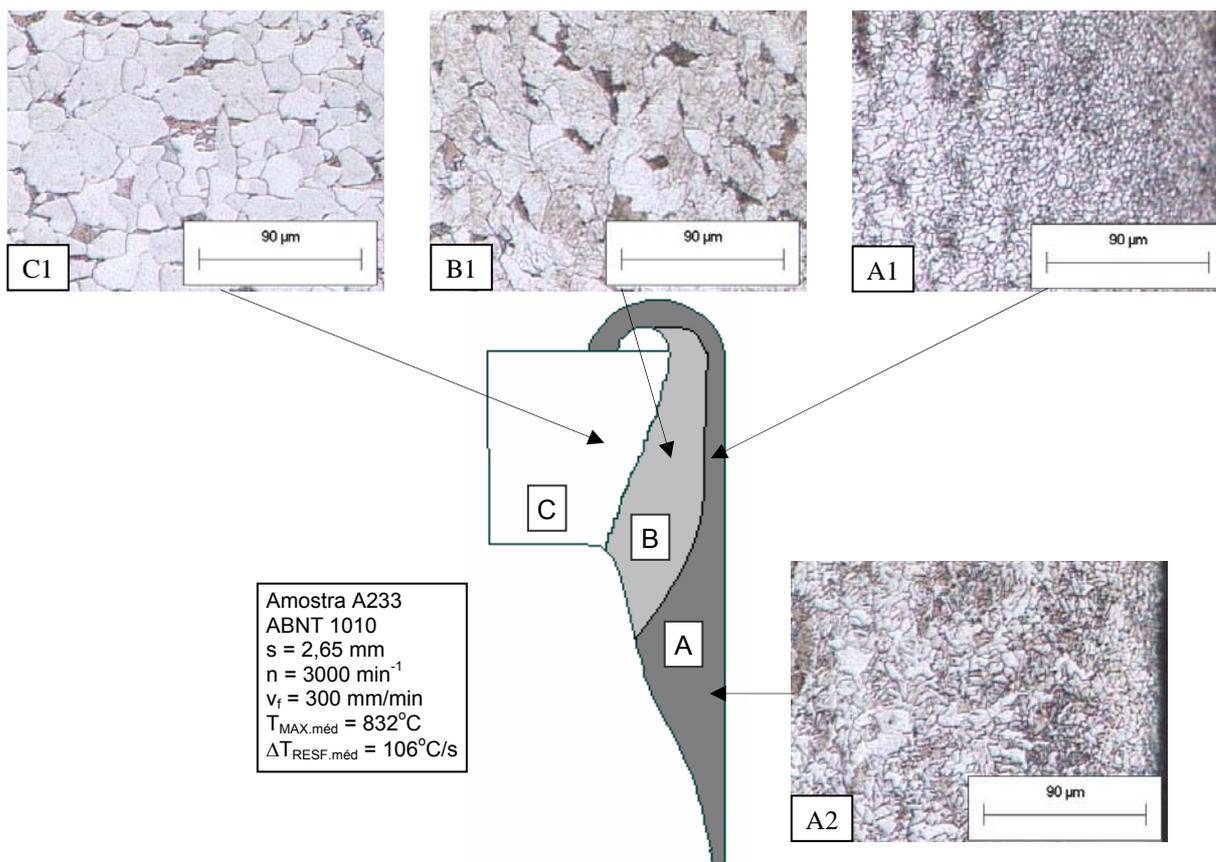


Figura 80 – Micrografias ópticas das regiões da amostra A233.

As micrografias das figuras 81 e 82 mostram a estrutura da rebarba inferior mais afetada termomecanicamente, composta por grãos com formato acicular, onde se visualizam grãos de ferrita de Widmanstätten.

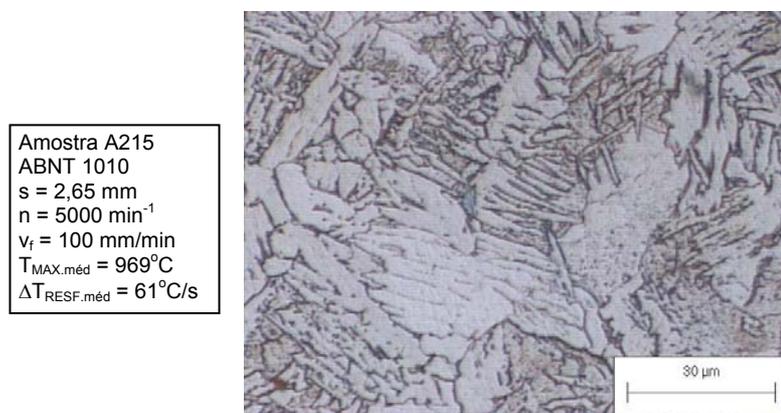


Figura 81 – Micrografia óptica da região da rebarba inferior da amostra A215.

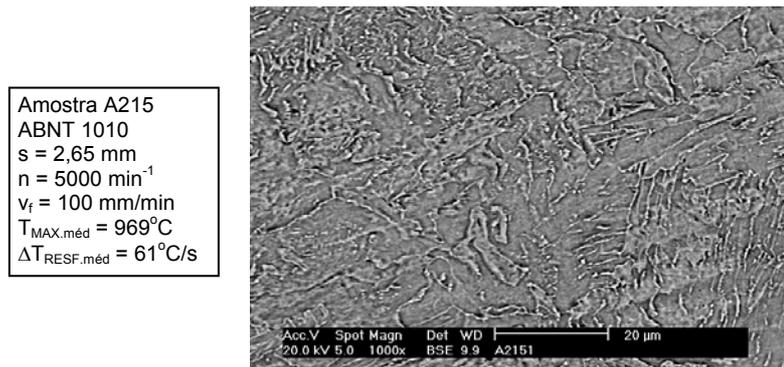


Figura 82 – Micrografia (MEV) da região da rebarba inferior.

A figura 83 detalha a região sobre a faixa B onde aparece o refino e um bandeamento de grãos grosseiros e finos.

As regiões R1, R2 e R3, na amostra A215, apresentaram valores de ZTA Total de 935, 1005 e 1390 μm, respectivamente. Na amostra A233 essas três regiões apresentaram valores inferiores de ZTA Total, de 910, 695 e 1085 μm.

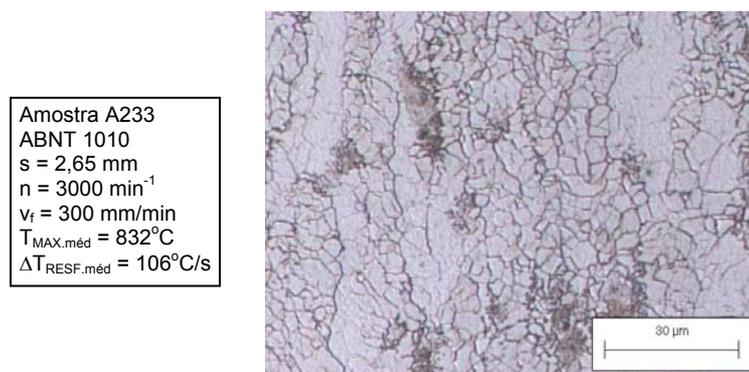


Figura 83 - Micrografia óptica mostrando o bandeamento dos grãos.

Nas figuras 84 e 85 estão ilustradas as micrografias das amostras C415 e C433, confeccionadas a partir de material contendo 0,13% de carbono e espessura s = 4,75 mm, com parâmetros de processo idênticos às amostras anteriores.

A micrografia C1 mostra a estrutura do material-base dessas amostras, o qual possui diâmetro médio de grão de 11,02 μm, com fator de forma médio de 0,63.

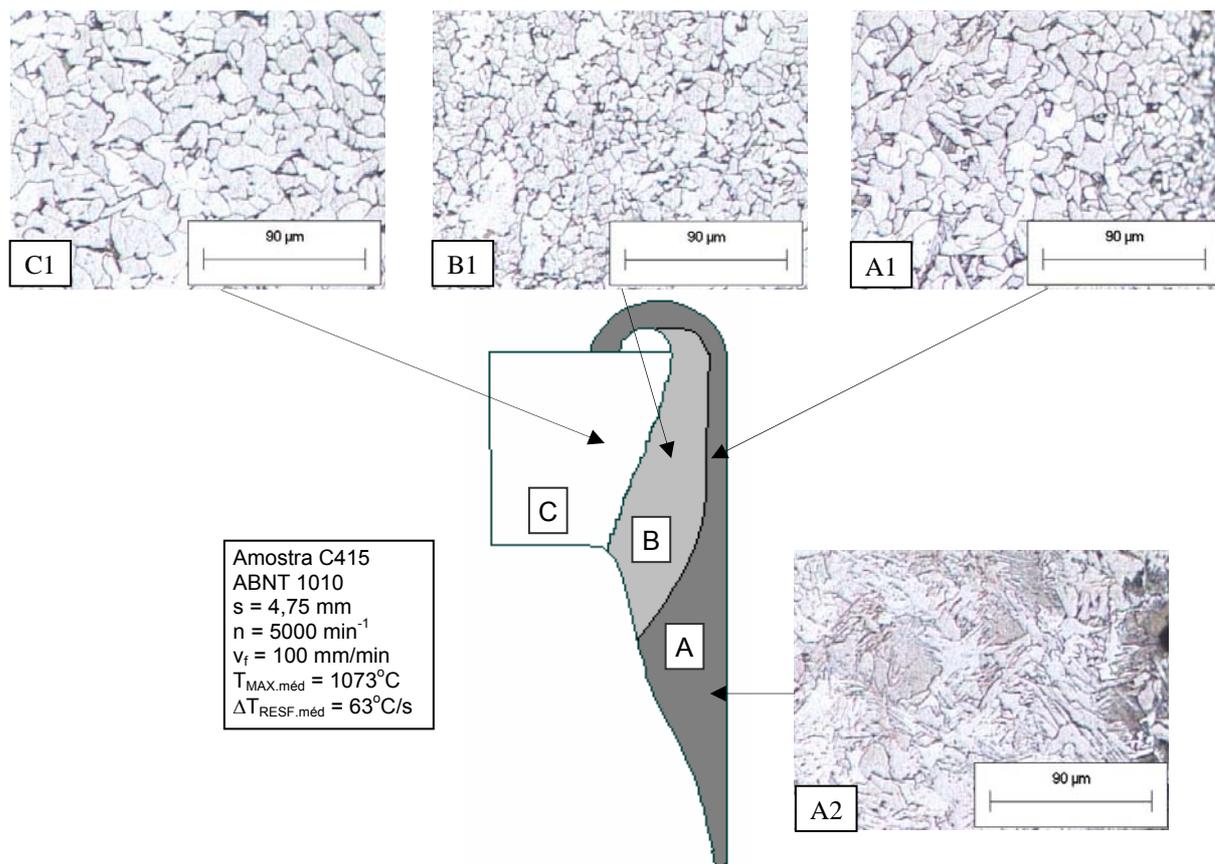


Figura 84 – Micrografias ópticas das regiões da amostra C415.

Comparando-se as micrografias A1 das amostras, percebe-se na amostra C415 uma estrutura formada em sua maioria por grãos grosseiros, com diâmetro médio de grão igual a $10,75 \mu\text{m}$ e fator de forma igual a 0,60. Já na amostra C433 essa região mostra uma estrutura altamente refinada, com diâmetro médio de grão igual a $5,03 \mu\text{m}$ e fator de forma igual a 0,65. A forma dos grãos nessas regiões se aproxima do formato apresentado pelos grãos do metal-base.

As micrografias A2, relativas à rebarba inferior, mostram para a amostra C415 uma estrutura altamente deformada composta por grãos grosseiros, com valor de diâmetro médio igual a $10,44 \mu\text{m}$. O fator de forma igual a 0,48 confirma a presença de grãos aciculares nessa estrutura. Na amostra C433, a estrutura se mostrou mais refinada, com diâmetro médio de grão igual a $9,69 \mu\text{m}$, apresentando também grãos aciculares (figura 86) com fator de forma médio igual a 0,49.

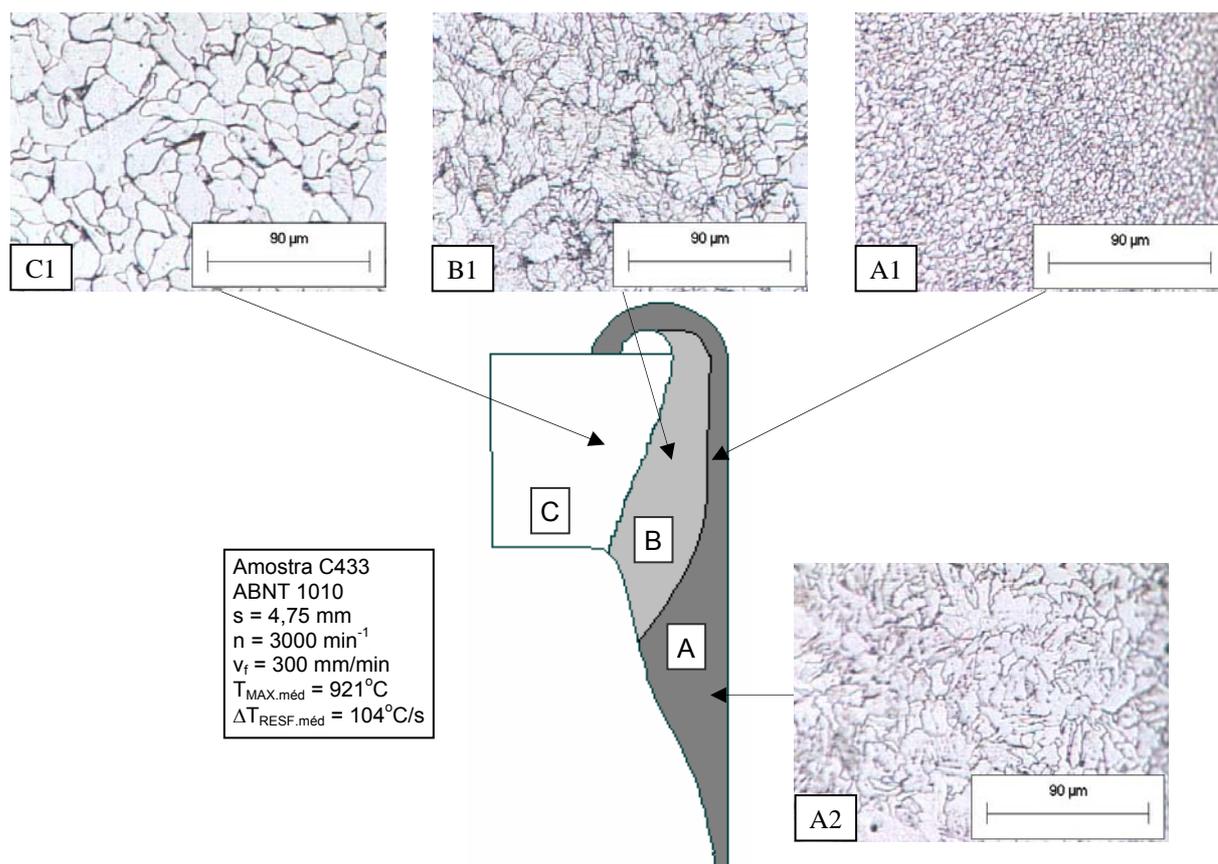


Figura 85 – Micrografias ópticas das regiões da amostra C433.

Para a faixa intermediária B, as micrografias B1 das amostras apresentam uma estrutura heterogênea composta por grãos grosseiros e grãos refinados. Esta região, na amostra C433, apresenta um maior refino de grãos do que na amostra C415. Nesta região a perlita aparece nos contornos dos grãos ferríticos refinados, conforme mostra a micrografia da figura 87.

As regiões R1, R2 e R3 da amostra C415 apresentaram valores de ZTA Total iguais a 1625, 1285 e 1650 μm , respectivamente, enquanto na amostra C433 estas regiões obtiveram os valores de 1520, 935 e 1545 μm para a ZTA Total.

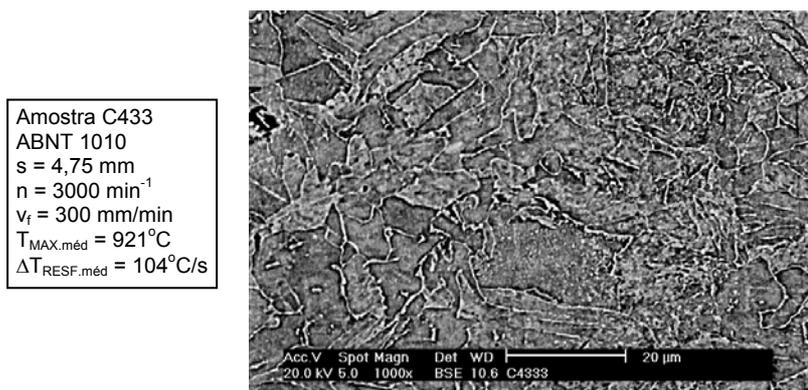


Figura 86 – Micrografia (MEV) da região inferior.

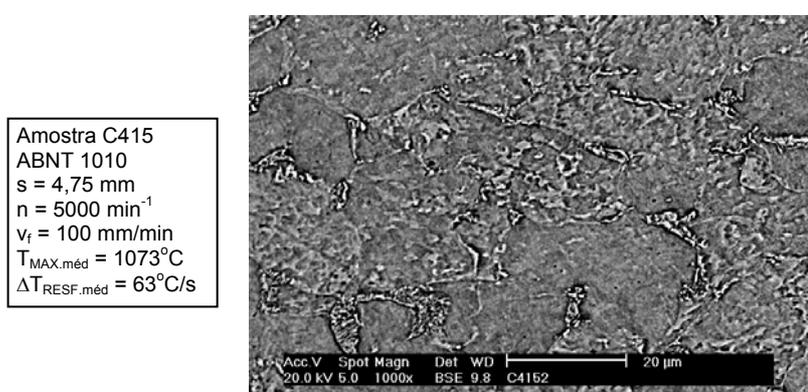


Figura 87 – Micrografia (MEV) mostrando a perlita no contorno de grão.

5.5.2 Influência da espessura do material

Analisando-se as micrografias obtidas nas amostras percebe-se que a microestrutura é influenciada pela alteração da espessura do material. Na comparação das amostras com mesmo teor de carbono e parâmetros de processo percebe-se que os grãos da faixa A, nas amostras com maior espessura, apresentaram valores mais elevados para o diâmetro médio, sendo que as maiores diferenças acontecem principalmente nas regiões inferiores da bucha. O fator de forma médio dos grãos apresenta valores mais elevados nas regiões superiores, com tendência de formação de grãos equiaxiais, principalmente nas amostras de menor espessura. As regiões inferiores apresentam fator de forma médio dos grãos com tendência a formação de grãos aciculares, principalmente nas amostras de maior espessura.

A faixa B das amostras de menor espessura apresenta uma estrutura mista composta por grãos de diâmetros diferentes com formato equiaxial e por grãos

refinados que se apresentam distribuídos sobre a região superior. Nas amostras de maior espessura, essa faixa apresentou grãos menos refinados, com heterogeneidade de diâmetro e de fator de forma, e alinhamento na direção de maior deformação.

Essas alterações nas microestruturas dos materiais podem ser percebidas nas micrografias das amostras B233 e B433 (figuras 88 e 89), as quais possuem o mesmo teor de carbono (0,04% C) e foram obtidas com as mesmas condições de ensaio ($n = 3000 \text{ min}^{-1}$ e $v_f = 300 \text{ mm/min}$), diferenciando-se apenas na espessura da chapa. A amostra B233 possui espessura de 2,65 mm, e a B433 de 4,75 mm.

As micrografias C1 das figuras se referem à estrutura apresentada pelos materiais-base das amostras, que possuem tanto diâmetro médio dos grãos quanto fator de forma médio de grãos estatisticamente iguais. O material-base da amostra B233 possui grãos com diâmetro médio de $12,06 \mu\text{m}$ e fator de forma de 0,62. Já o material-base da amostra B433 apresenta um diâmetro médio de grão igual a $15,04 \mu\text{m}$ e fator de forma médio igual a 0,66.

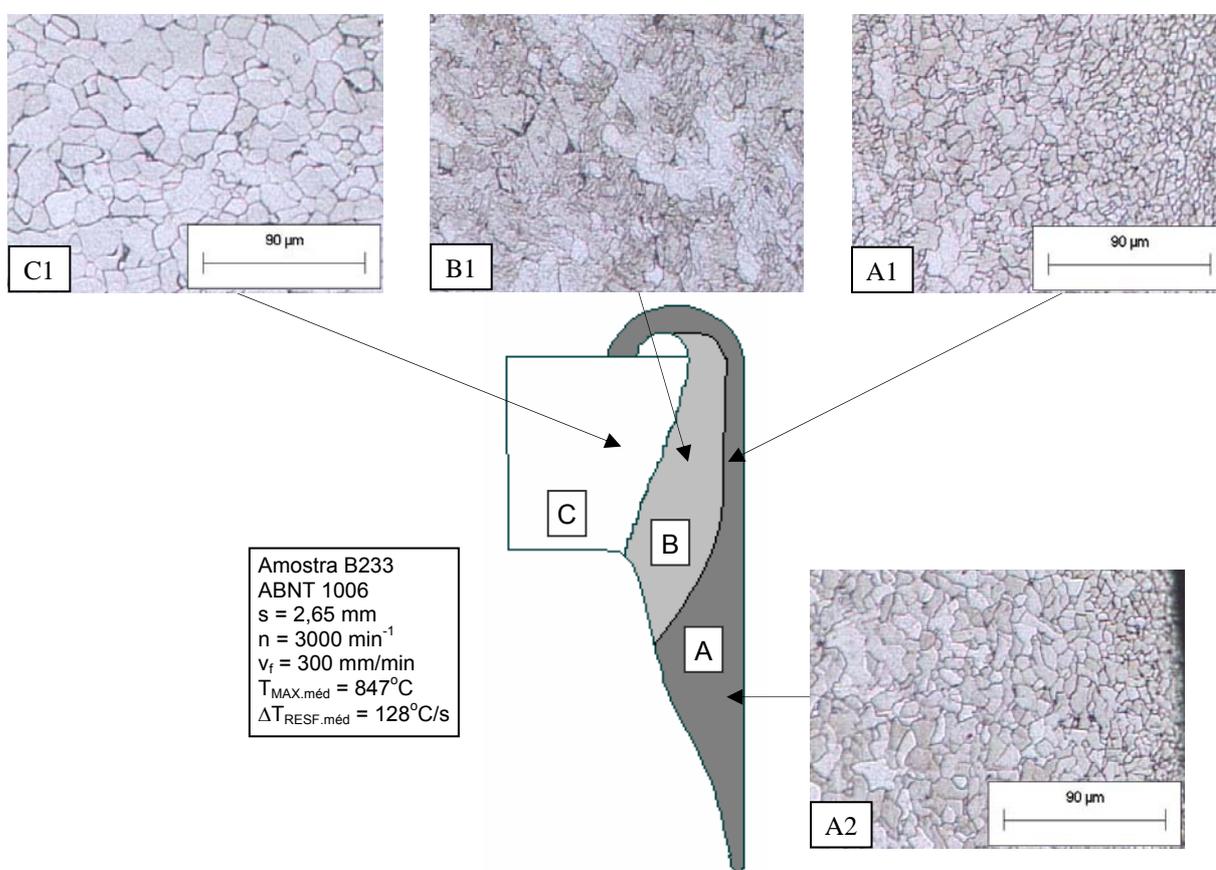


Figura 88 – Micrografias ópticas das regiões da amostra B233.

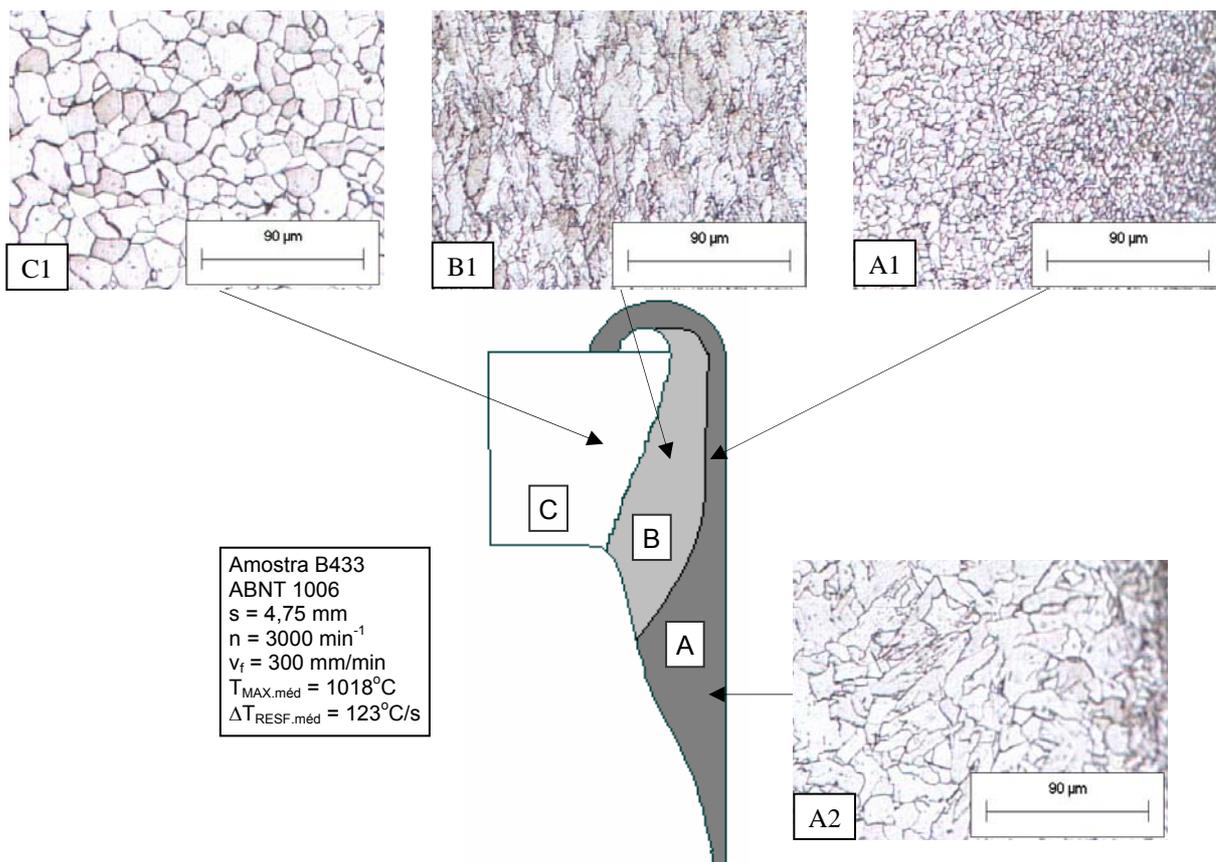


Figura 89 – Micrografias ópticas das regiões da amostra B433.

As micrografias A1 mostram a ocorrência de refino dos grãos nas amostras, com maior intensidade junto à borda interna do furo da bucha, sendo que os grãos se apresentam com formato equiaxial. O diâmetro médio dos grãos é estatisticamente igual, sendo que os grãos na amostra B233 atingiram diâmetro médio igual a $5,47 \mu\text{m}$, e na amostra B433 alcançaram valores de diâmetro médio igual a $5,05 \mu\text{m}$. Já o fator de forma apresenta valores estatisticamente diferentes, com valor de 0,71 para os grãos da amostra B233, e de 0,63 para os grãos da amostra B433.

A condição da estrutura da rebarba inferior das buchas escoadas pode ser visualizada nas micrografias A2. Os grãos das amostras possuem médias diferentes tanto para os valores do diâmetro médio quanto para o fator de forma. Essa região na amostra B233 apresenta uma estrutura menos refinada que na região da micrografia A1, com valores do diâmetro médio e fator de forma dos grãos iguais a $8,74 \mu\text{m}$ e 0,68, respectivamente. Os grãos na amostra B433 apresentaram diâmetro médio de $11,67 \mu\text{m}$ e fator de forma médio de 0,59, maiores e mais alinhados que na

amostra B233.

Nestas amostras, a faixa intermediária (micrografias B1) também apresentou uma estrutura heterogênea. Na amostra B233 visualiza-se uma estrutura mista de grãos grosseiros e refinados. Já na amostra B433 pode ser verificada uma estrutura com bandeamento e alinhamento de grãos grosseiros e finos.

A ZTA Total das regiões R1, R2 e R3 na amostra B233 apresentou os valores de 630, 585 e 1110 μm , e na amostra B433 essas regiões alcançaram ZTA Total de 1370, 825 e 1525 μm .

5.5.3 Influência do teor de carbono do material

Após a aplicação do processo, a microestrutura do material-base de amostras confeccionadas com espessura e parâmetros de trabalho idênticos, mas contendo teores de carbono diferentes, apresentou alterações distintas para as mesmas regiões avaliadas.

Comparando-se os diâmetros dos grãos apresentados nos diferentes casos, percebe-se que nas amostras confeccionadas a partir de chapas com maiores teores de carbono (0,11% e 0,13% de C), a faixa A apresenta um refino de maior intensidade, principalmente para as regiões superiores, junto à borda do furo da bucha. O formato dos grãos também difere com a alteração do teor de carbono, com menor diferença no fator de forma para as regiões superiores, mas com maior intensidade em direção à rebarba inferior, onde se constata uma estrutura composta por grãos aciculares em maior número nas amostras com maior teor de carbono.

Nas amostras com menores teores de carbono (0,04% C) a faixa intermediária B apresenta na região superior uma estrutura composta por grãos grosseiros com formato equiaxial e intensa formação de grãos refinados. Na região inferior ocorreu uma diminuição do refinamento e o aparecimento de grãos com formato acicular. Nas amostras que contém maior teor de carbono, a estrutura da região superior é composta por grãos grosseiros deformados na direção de escoamento, por perlita bandeada e pequena quantidade de grãos refinados. Em direção à região inferior a quantidade de grãos refinados diminui, desaparece o bandeamento e ocorre uma intensa formação de grãos aciculares.

As figuras 90 e 91 apresentam as micrografias das amostras A224 e B224 obtidas a partir de parâmetros de trabalho idênticos, diferenciando-se apenas no teor de carbono, 0,13% e 0,04%, respectivamente.

As faixas C das figuras, referentes aos metais-base das amostras, apresentaram diâmetros médios de grão e fatores de forma médios estatisticamente iguais. Na amostra A224 a micrografia C1 mostra uma estrutura com diâmetro médio de grão igual a $14,60\ \mu\text{m}$ e um fator de forma médio igual a 0,62. Na amostra B224 a estrutura nessa região apresentou valores de diâmetro e fator de forma médios dos grãos de $12,06\ \mu\text{m}$ e 0,62, respectivamente.

As micrografias A1, relativas à faixa A, apresentaram para ambas as amostras grãos altamente refinados, com valores de diâmetro médio de $5,07\ \mu\text{m}$ na amostra A224 e de $7,76\ \mu\text{m}$ na B224. Como característica, o refino concentra-se junto à borda interna dos furos das buchas (lado direito das micrografias). Os fatores de forma dos grãos para essa região são estatisticamente iguais, apresentando valores de 0,69 e 0,70 nestas amostras.

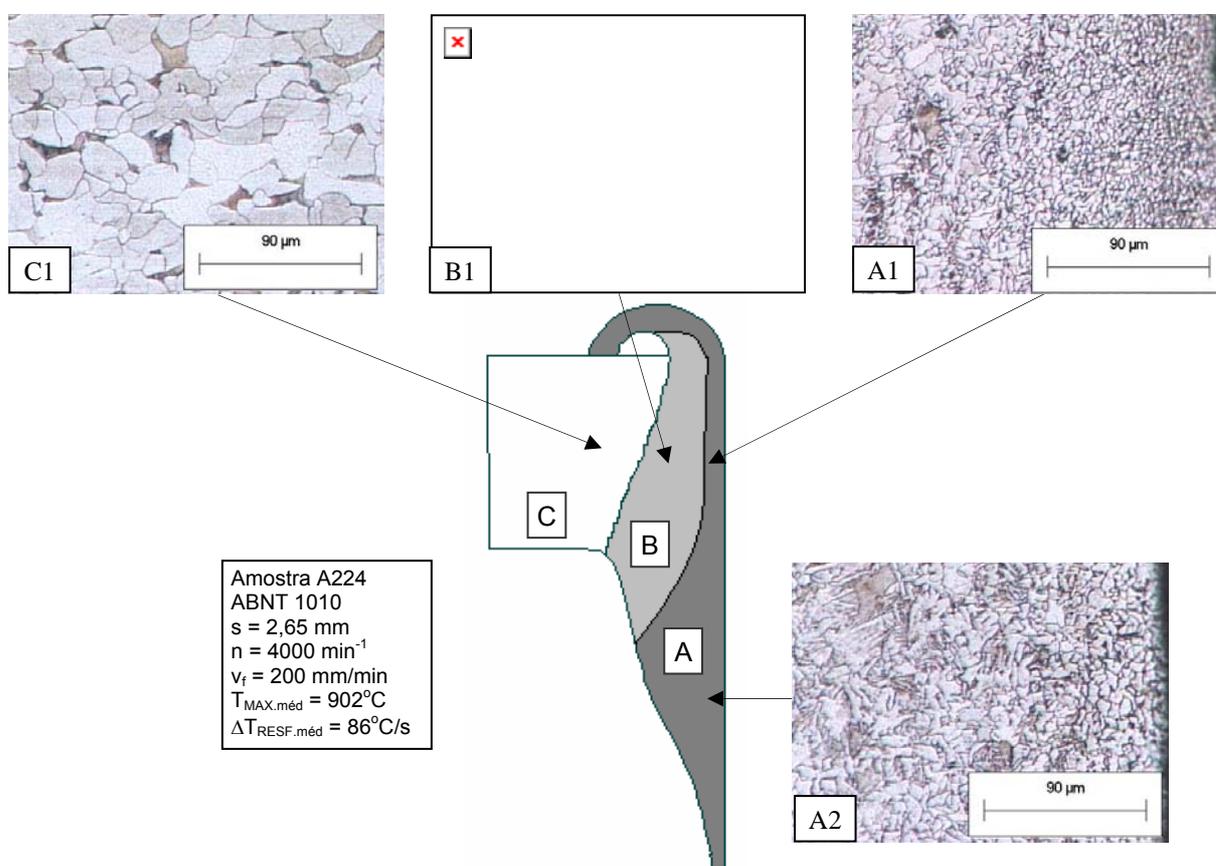


Figura 90 – Micrografias ópticas das regiões da amostra A224.

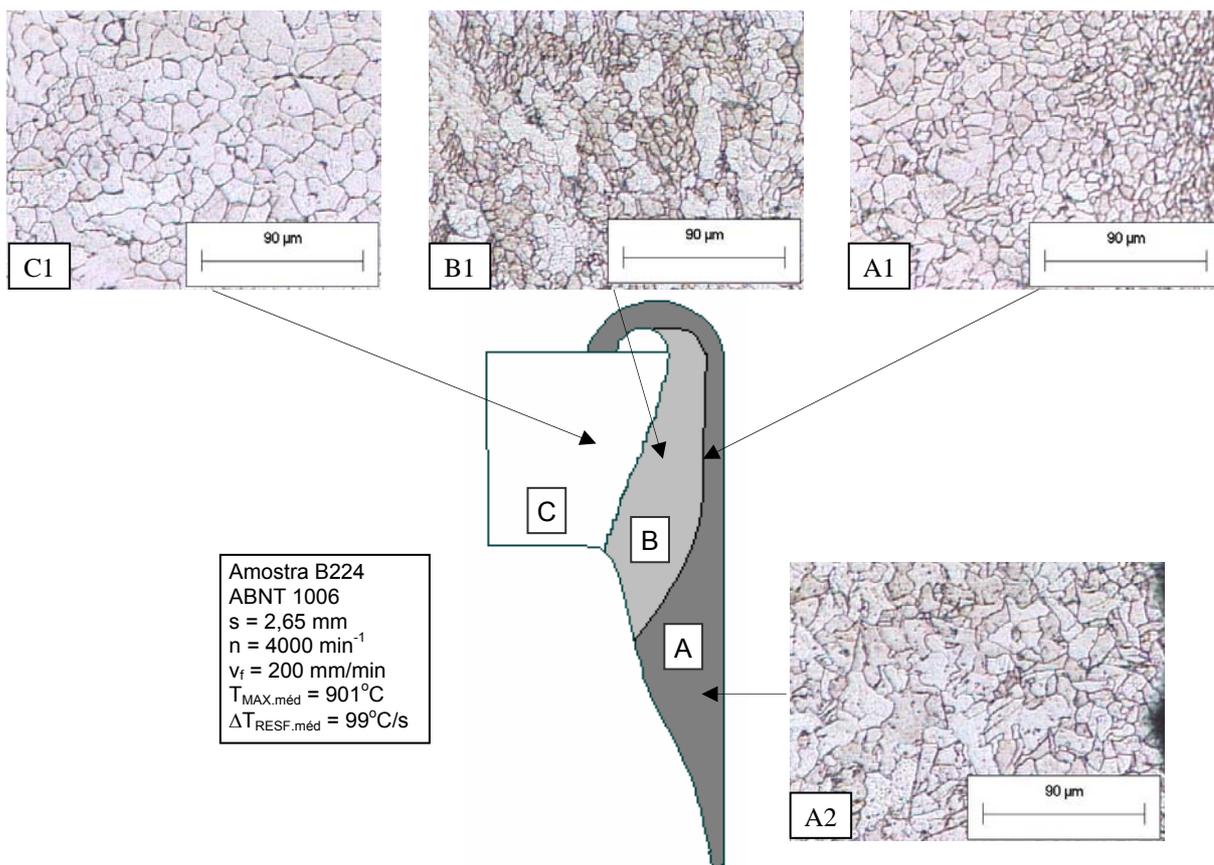


Figura 91 – Micrografias ópticas das regiões da amostra B224.

Nas figuras, as micrografias A2 mostram a estrutura presente na rebarba inferior da bucha escoada nas amostras. Percebe-se que os grãos presentes possuem diâmetros médios maiores que os das micrografias A1, com valores iguais a $6,44 \mu\text{m}$ na amostra A224 e $8,71 \mu\text{m}$ na B224. O formato dos grãos, ao contrário da micrografia A1, é diferente. Na amostra A224 a estrutura é composta por grãos mais aciculares, com fator de forma igual a 0,60, enquanto na amostra B224 a estrutura é composta por grãos mais equiaxiais, com fator de forma médio igual a 0,68.

A micrografia B1, na amostra A224, mostra uma estrutura composta por grãos grosseiros, enquanto na amostra B224, apresenta uma estrutura mista formada por grãos grosseiros e refinados.

Na amostra A224, as regiões R1, R2 e R3 apresentaram valores de ZTA Total de 850, 820 e $1150 \mu\text{m}$, respectivamente. Na amostra B224 a ZTA Total apresentou valores de 980, 915 e $1200 \mu\text{m}$, para essas três regiões.

As figuras 92 e 93 apresentam as micrografias referentes às amostras B424 e C424 obtidas a partir de parâmetros de trabalho idênticos, e cujos materiais-base possuem teores de carbono de 0,04% e 0,11%, respectivamente.

As micrografias C1 mostram as microestruturas dos materiais-base dessas amostras, sendo que os valores dos diâmetros médios dos grãos são estatisticamente diferentes e os fatores de forma médios estatisticamente iguais. Na amostra B424 o valor do diâmetro médio foi igual a $15,04 \mu\text{m}$, e o fator de forma médio foi igual a 0,66, enquanto na amostra C424 os valores do diâmetro e do fator de forma médios dos grãos foram de $11,02 \mu\text{m}$ e 0,63, respectivamente.

As micrografias A1 apresentaram para ambas as amostras grãos refinados, sem que houvesse diferenças significativas entre as médias dos diâmetros dos grãos. Na amostra B424 os grãos possuem o valor de diâmetro médio de $7,80 \mu\text{m}$ e na amostra C424 o valor médio de $7,90 \mu\text{m}$. Os valores do fator de forma médio para essa região são diferentes, 0,70 na amostra B424 e 0,63 na amostra C424.

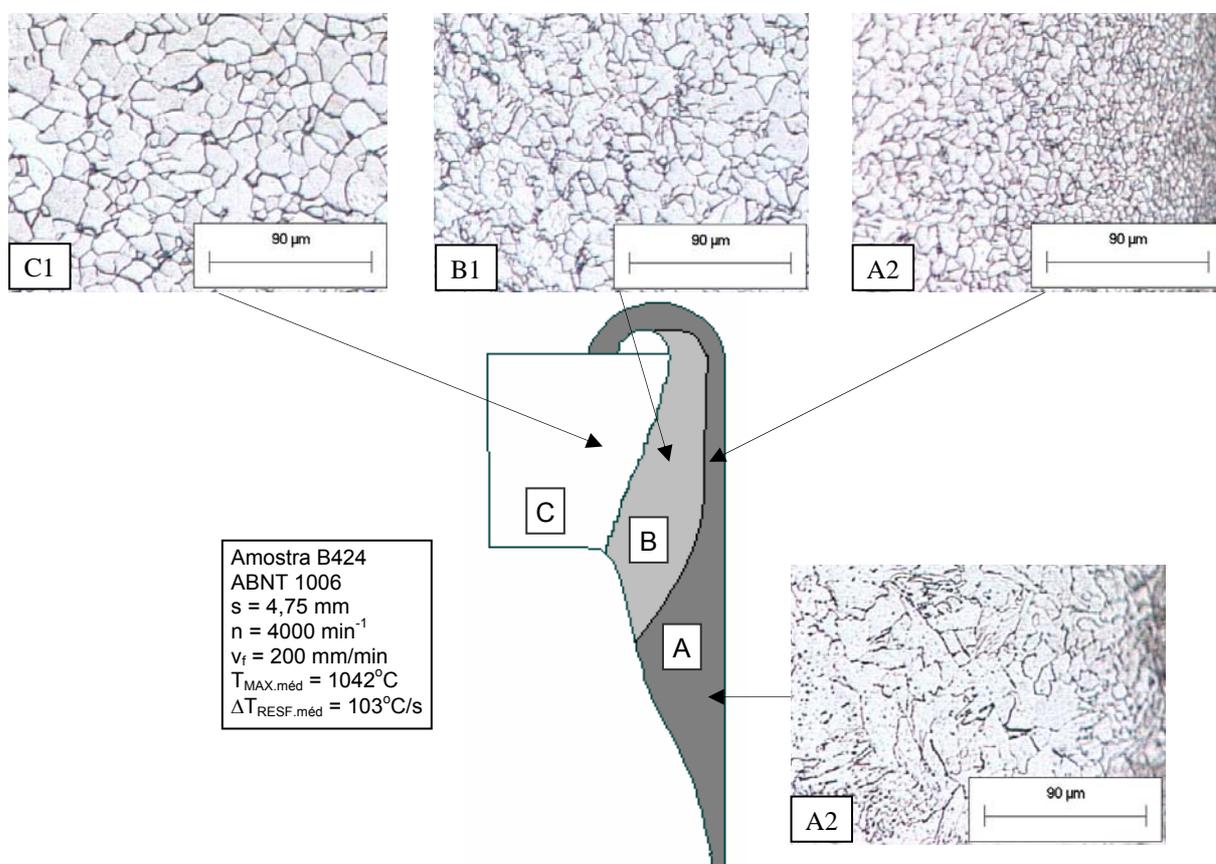


Figura 92 – Micrografias ópticas das regiões da amostra B424.

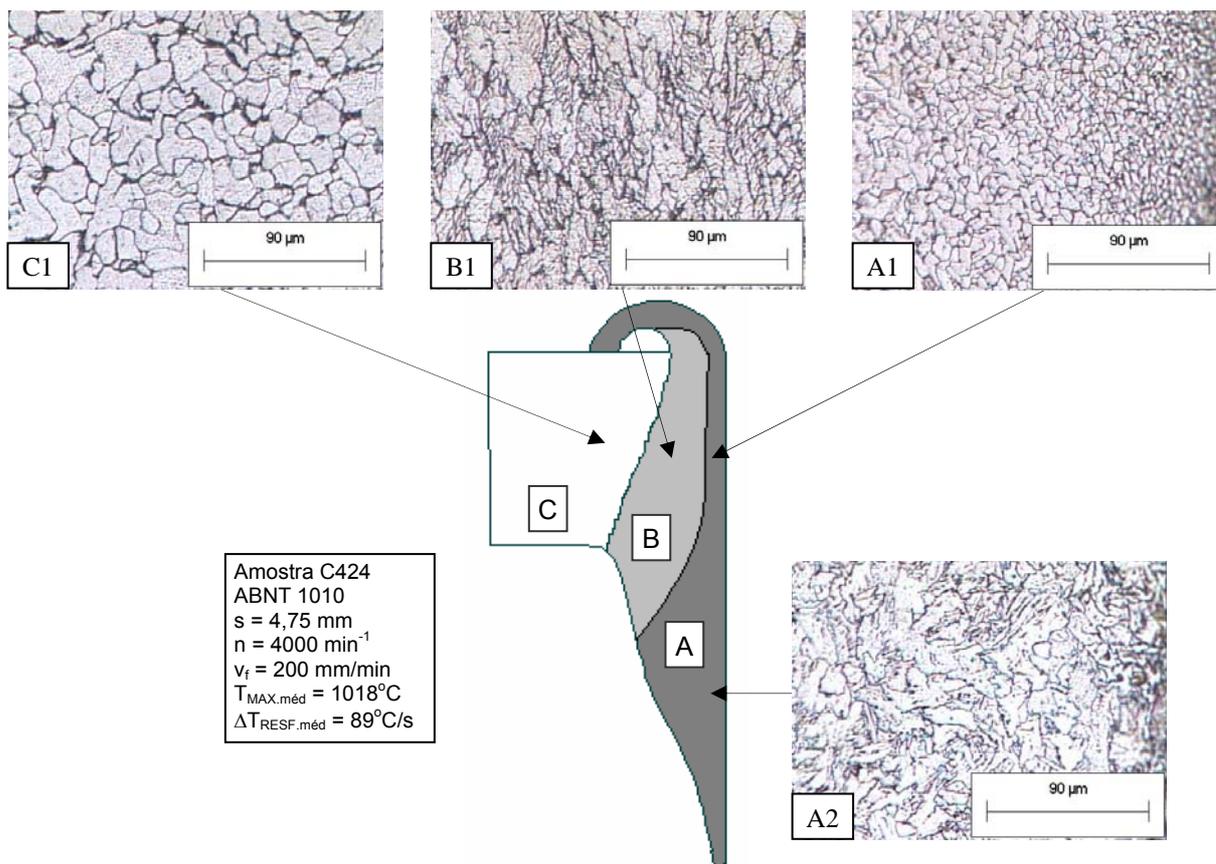


Figura 93 – Micrografias ópticas das regiões da amostra C424.

As micrografias A2 das figuras mostram a estrutura da região da rebarba inferior das buchas escoadas nas amostras. Os grãos desta região apresentaram diâmetros médios maiores que os das micrografias A1. Na amostra B424 a estrutura apresenta grãos com tamanho médio igual a $11,09 \mu\text{m}$, enquanto na amostra C424 o tamanho médio é igual a $10,44 \mu\text{m}$. Os fatores de forma médios são estatisticamente diferentes, sendo que na amostra B424 os grãos possuem valor médio igual a 0,65 e na amostra C424 igual a 0,44. Estes valores de fator de forma indicam a presença de grãos aciculares nessas regiões.

Nas micrografias B1 verifica-se uma estrutura heterogênea composta por grãos refinados e grãos grosseiros na amostra B424, e uma estrutura formada por grãos grosseiros deformados na direção do escoamento e por grãos refinados na amostra C424.

Os valores alcançados pela ZTA Total nas regiões R1, R2 e R3 na amostra B424 foram iguais a 1305, 1090 e 1265 μm , respectivamente. A ZTA Total na amostra C424 obteve valores iguais a 1370, 825 e 1525 μm para essas três regiões.

Nas micrografias B1 verifica-se uma estrutura heterogênea composta por grãos refinados e grãos grosseiros na amostra B424, e uma estrutura formada por grãos grosseiros deformados na direção do escoamento e por grãos refinados na amostra C424.

Os valores alcançados pela ZTA Total nas regiões R1, R2 e R3 na amostra B424 foram iguais a 1305, 1090 e 1265 μm , respectivamente. A ZTA Total na amostra C424 obteve valores iguais a 1370, 825 e 1525 μm para essas três regiões.

5.6 Microdureza das Buchas Escoadas

A microdureza das regiões deformadas nas amostras foi determinada segundo o item 4.12.1, e seus valores foram comparados com os respectivos materiais-base, cujos valores constam na tabela 6 (item 4.4).

Inicialmente, observa-se em todas as amostras que a zona termomecânica afetada (ZTA) das buchas escoadas apresenta valores de microdureza mais elevados que o material-base. O maior aumento ocorre próximo à borda do furo da bucha, principalmente nas regiões R1 e R2 (figura 63, item 4.12.1) situadas mais próximas à superfície superior da chapa. Afastando-se da borda do furo da bucha em direção ao material-base da amostra, os valores da microdureza vão diminuindo.

5.6.1 Influência dos parâmetros de trabalho

Os resultados indicam uma tendência a valores mais elevados de microdureza na região deformada de buchas escoadas confeccionadas com velocidades de avanço maiores e rotações menores. Isto pode ser verificado comparando-se as figuras 94 e 95 que apresentam os valores das microdurezas obtidas nas amostras B215 ($n = 5000 \text{ min}^{-1}$, $v_f = 100 \text{ mm/min}$) e B233 ($n = 3000 \text{ min}^{-1}$ e $v_f = 300 \text{ mm/min}$). O material-base das amostras possui espessura $s = 2,65 \text{ mm}$, 0,04% de teor de carbono e microdureza média igual a 135 HV.

Com a amostra B215 obtiveram-se valores de microdureza entre 180 e 200 HV próximo à borda do furo da bucha, enquanto na amostra B233 essa mesma região obteve valores variando entre 200 e 230 HV.

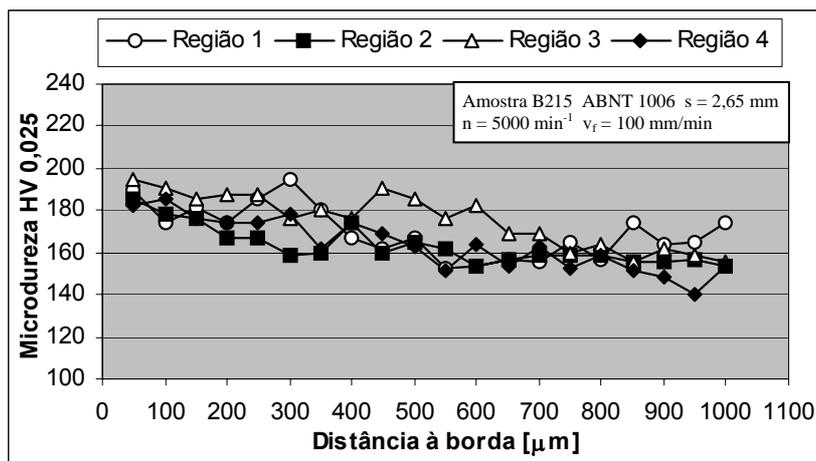


Figura 94 – Gráfico da distribuição da microdureza HV 0,025 da amostra B215.

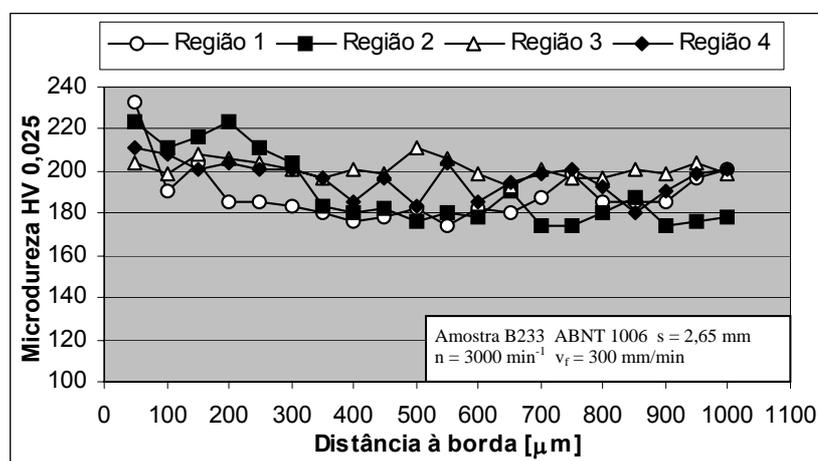


Figura 95 – Gráfico da distribuição da microdureza HV 0,025 da amostra B233.

Além disso, em uma mesma amostra a microdureza das quatro regiões analisadas (figura 63) também sofre influência dos parâmetros de trabalho, sendo que para valores elevados de rotação (5000 min^{-1}) e pequenos de velocidade de avanço (100 mm/min) as regiões R3 e R4 (próximas à superfície inferior e rebarba inferior) apresentam os maiores valores de microdureza. Para valores intermediários de rotação e de velocidade de avanço, 2000 min^{-1} e 200 mm/min , respectivamente, as regiões com maiores microdurezas foram as regiões R2 e R3 (média da espessura e próxima a superfície inferior, respectivamente). Para valores baixos de rotação (3000 min^{-1}) e elevados de velocidade de avanço (300 mm/min), a tendência é que as regiões R1 e R2 (próximas à superfície superior e média da espessura) se destaquem com valores mais elevados de microdureza. Estas tendências podem ser observadas nas figuras 96 a 98.

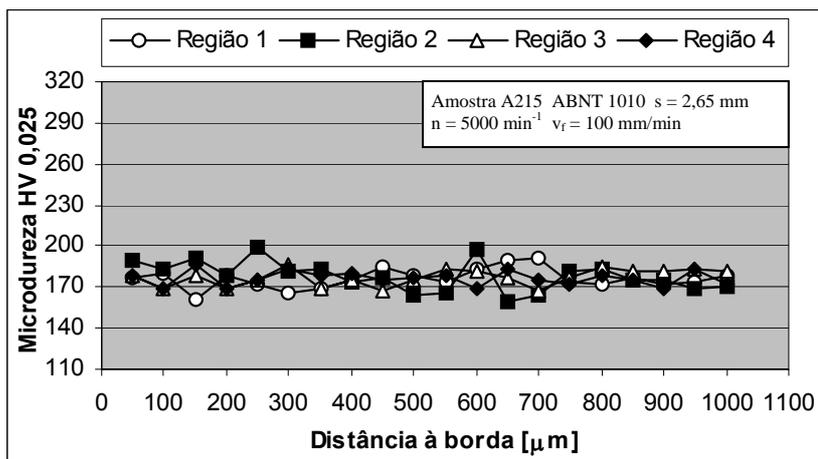


Figura 96 – Gráfico da distribuição da microdureza HV 0,025 da amostra A215.

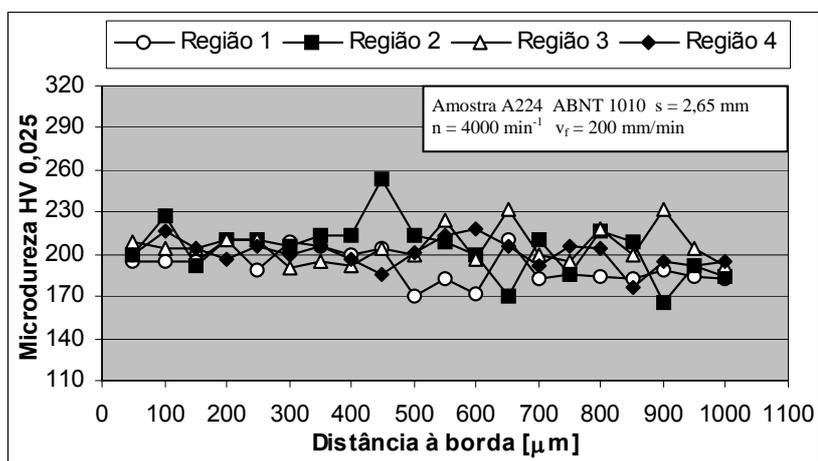


Figura 97 – Gráfico da distribuição da microdureza HV 0,025 da amostra A224.

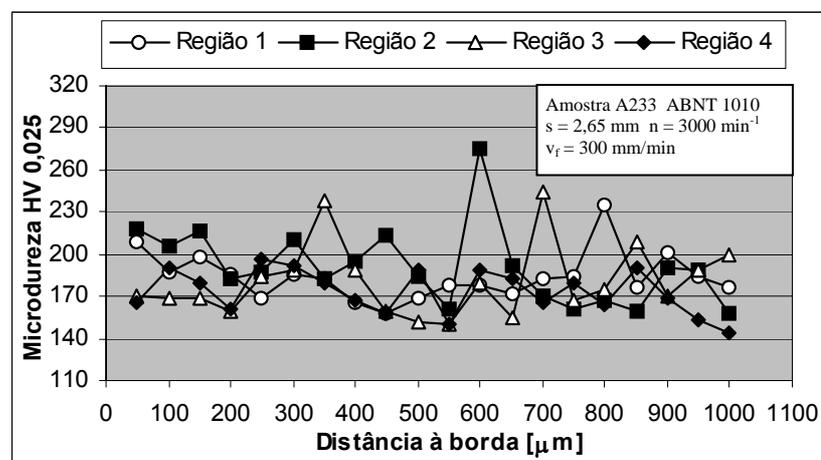


Figura 98 – Gráfico da distribuição da microdureza HV 0,025 da amostra A233.

5.6.2 Influência da espessura do material

A partir da análise dos valores de microdureza obtidos nas amostras verifica-se que a variação da espessura da chapa apresenta influência sobre a microdureza.

As figuras 99 e 100 apresentam os gráficos de microdureza de buchas escoadas nas amostras B224 (espessura $s = 2,65$ mm) e B424 (espessura $s = 4,75$ mm), confeccionados a partir de iguais parâmetros de trabalho ($n = 4000 \text{ min}^{-1}$ e $v_f = 200 \text{ mm/min}$) e teores de carbono (0,04% C). Comparando-se os valores obtidos, verifica-se na amostra com maior espessura um maior incremento da microdureza em comparação com os valores de microdureza obtidos na amostra com menor espessura.

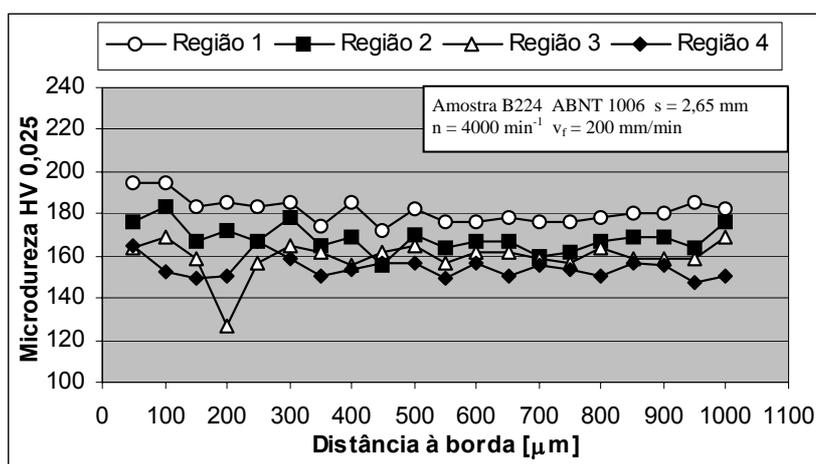


Figura 99 – Gráfico da distribuição da microdureza HV 0,025 da amostra B224.

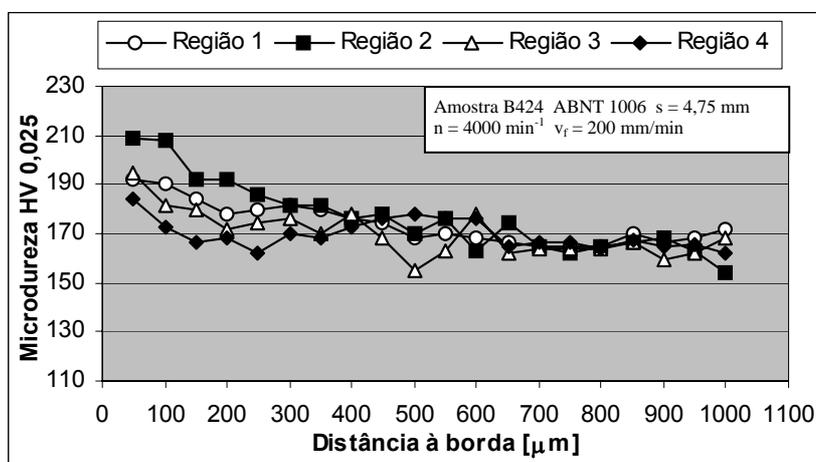


Figura 100 – Gráfico da distribuição da microdureza HV 0,025 da amostra B424.

Para uma microdureza média de 114 HV no material-base, a borda do furo da bucha escoada na amostra B424 apresentou valores mais elevados de microdureza, variando de 180 a 210 HV dependendo da região analisada, caracterizando aumentos relativos entre 50 e 80%. Na amostra B224, cujo material-base possui valor médio de 135 HV, os valores de microdureza variaram entre 160 e 200 HV, podendo ser considerados semelhantes aos obtidos na amostra anterior, mas os aumentos relativos atingiram valores inferiores, entre 20 e 50%.

5.6.3 Influência do teor de carbono do material

A análise dos resultados obtidos nas amostras demonstra que a variação do teor de carbono das chapas apresenta influência sobre os valores de microdureza das buchas escoadas (furos).

As buchas escoadas obtidas a partir de chapas contendo os maiores teores de carbono em sua composição (0,11% e 0,13% de C) apresentaram valores mais elevados de microdureza próxima à borda do furo da bucha. Já a borda dos furos de buchas escoadas obtidas a partir de material-base (chapas) contendo os menores teores de carbono (0,04% de C) apresentou valores mais reduzidos de microdureza.

As figuras 97 e 99 apresentam os gráficos da microdureza das buchas escoadas produzidas nas amostras A224 e B224 ($n = 4000 \text{ min}^{-1}$ e $v_f = 200 \text{ mm/min}$; teores de carbono de 0,13% e 0,04%, respectivamente). Verifica-se que a microdureza apresentada pelas quatro regiões analisadas na amostra A224 varia entre 190 e 230 HV, enquanto na B224 a microdureza das regiões varia entre 180 e 200 HV. Em termos relativos, considerando-se a microdureza dos materiais-base (172 HV para amostra A224 e 135 HV para a amostra B224) a tendência se inverte, pois a variação da microdureza na amostra A224 apresenta aumentos entre 10 e 30%, enquanto na amostra B224 apresenta aumentos entre 30 e 45%.

Essa tendência se mantém quando se comparam os valores das microdurezas obtidos nas amostras B433 (0,04% de C) e C433 (0,11% de C), conforme as figuras 101 e 102. Com a amostra C433 obtiveram-se valores entre 180 e 240 HV, enquanto com a amostra B433 obtiveram-se valores variando entre 180 e 210 HV. Em termos relativos, quando considera-se a microdureza dos materiais-base, a microdureza na amostra B433 apresenta aumentos variando entre 60 e 80% em relação à microdureza do material-base de 114 HV, enquanto na amostra C433

os valores da microdureza variam entre 30 e 70% em relação à do material-base de 141 HV.

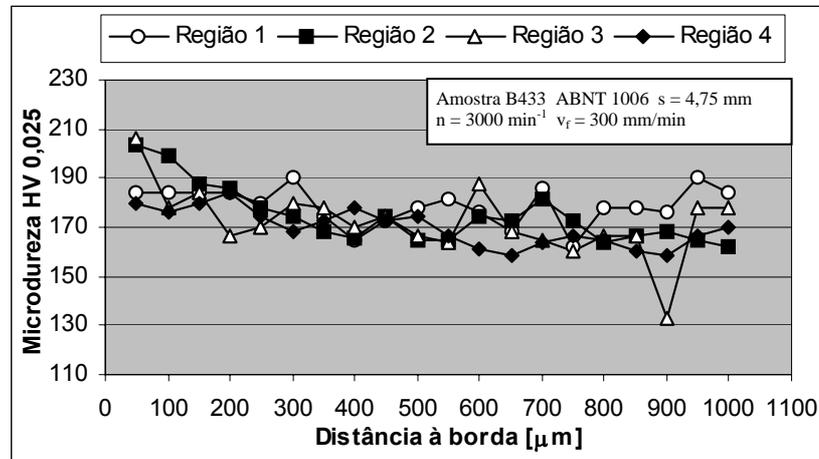


Figura 101 – Gráfico da distribuição da microdureza HV 0,025 da amostra B433.

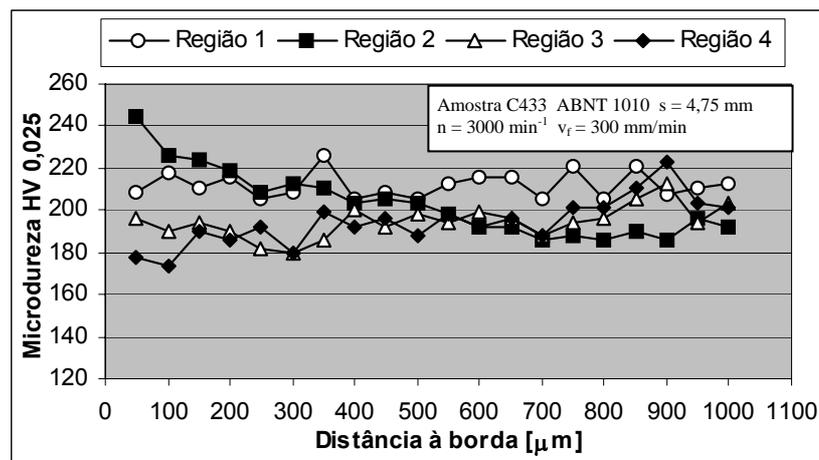


Figura 102 – Gráfico da distribuição da microdureza HV 0,025 da amostra C433.

5.7 Análise das Buchas Roscadas

A produção de roscas em furos através do emprego de machos de conformação promove uma grande deformação no material, ocasionando encruamento acentuado e um aumento significativo da dureza na borda dos filetes (de até 100% em relação ao material original) [22]. As figuras 103 a 105 apresentam micrografias dos filetes da rosca conformada em uma bucha escoada produzida na

amostra A224 ($v_f = 200 \text{ mm/min}$, $n = 4000 \text{ min}^{-1}$), cujo material-base contém 0,13% de carbono e espessura de 2,65 mm. Nas figuras são mostradas as micrografias das regiões do fundo, do flanco e da crista (garra) dos filetes da rosca, onde podem ser observadas estruturas de grãos altamente deformados.

Na figura 106 apresentam-se as micrografias do material-base (como recebido) da amostra A224, e da borda do furo da bucha somente escoada.

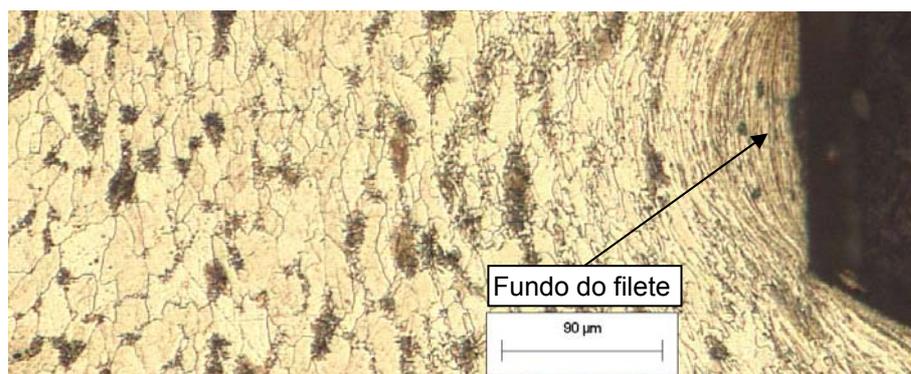


Figura 103 – Deformação do material no fundo do filete da rosca.

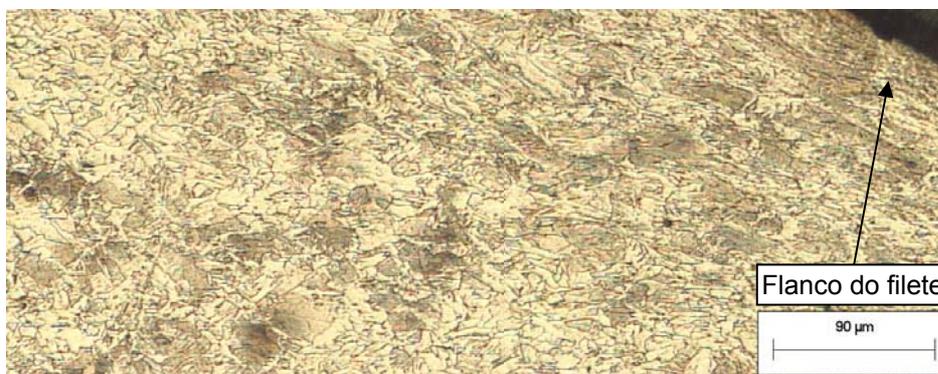


Figura 104 – Deformação do material no flanco do filete da rosca.

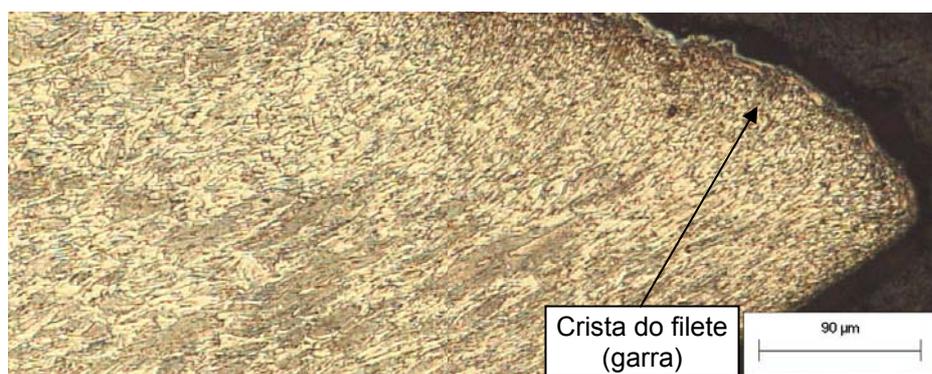


Figura 105 – Deformação do material na crista do filete (garra) da rosca.

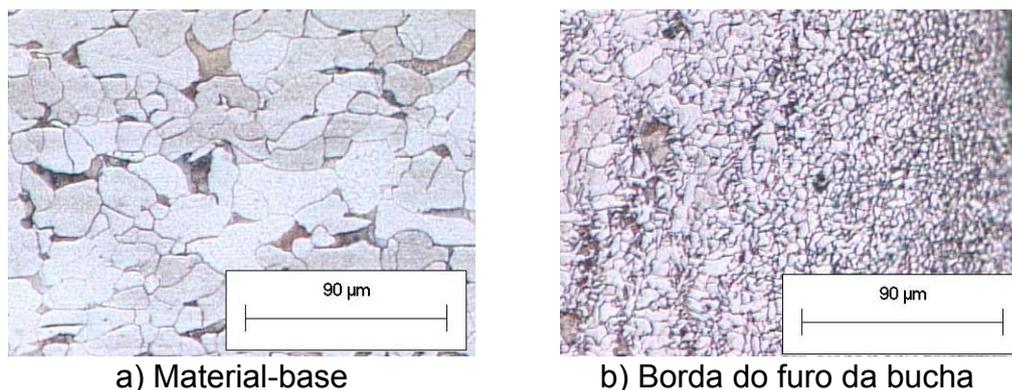


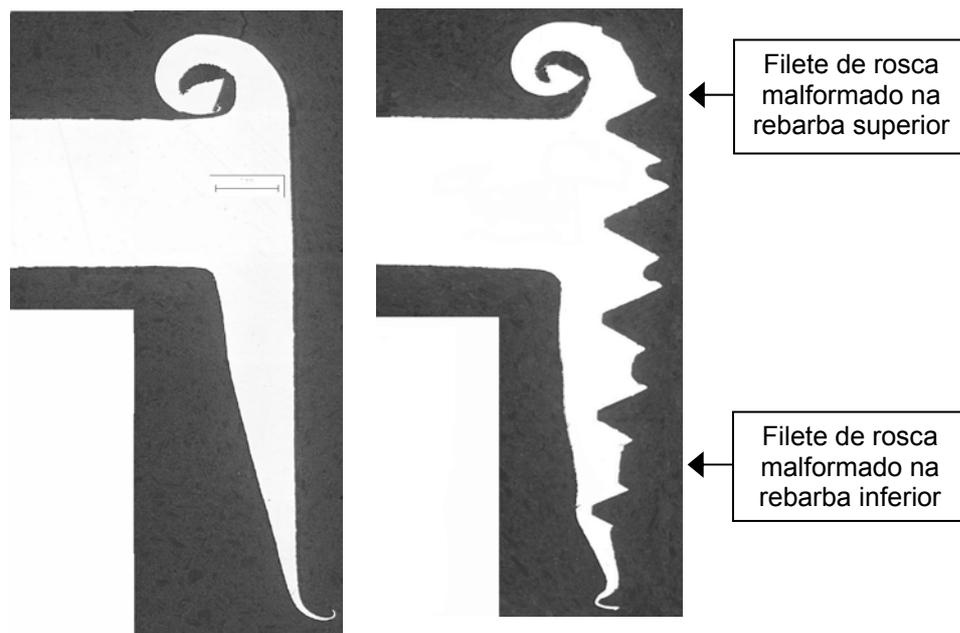
Figura 106 – Micrografia óptica do material-base (a) e da borda do furo da bucha escoada (b) na amostra A224.

As figuras 107 e 108 mostram o perfil característico apresentado pelas buchas escoadas e posteriormente roscadas produzidas em chapas de 2,65 mm e 4,75 mm de espessura. Na chapa com espessura de 2,65 mm formaram-se 4 filetes no comprimento da bucha escoada, enquanto na chapa de 4,75 mm, formaram-se 6 filetes.

Observa-se que os filetes de rosca produzidos na entrada (rebarba superior) e na saída (rebarba inferior) das buchas roscadas apresentam malformação e alturas menores que os filetes de rosca produzidos na região que abrange a espessura da chapa, onde constatam-se diferenças de até 0,40 mm entre essas regiões. Essas variações na altura dos filetes da rosca provêm das deformações produzidas na parede das rebarbas superior e inferior que, durante o processo de rosqueamento, escoam na direção radial, e também em virtude do menor volume de material ali existente. A malformação dos filetes nessas regiões é acentuada nas buchas roscadas produzidas nas chapas de menor espessura ($s = 2,65$ mm).

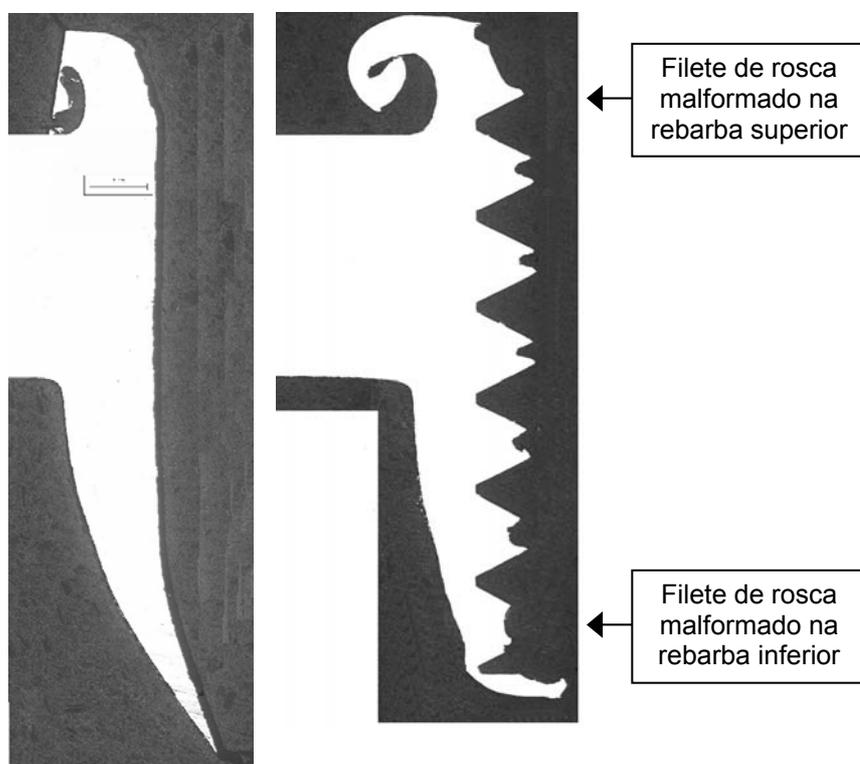
Para todas as condições de trabalho empregadas nos ensaios de furação por escoamento ocorreu malformação de filetes nas regiões especificadas, mas principalmente nas buchas escoadas com $v_f = 100$ mm/min e $n = 5000$ min⁻¹, em virtude de apresentarem paredes mais finas e mais alongadas.

O diâmetro das buchas escoadas, medidos na região da espessura da chapa, apresentou o valor médio de 10,98 mm, bem próximo do diâmetro da ferramenta de furação por escoamento empregada. O diâmetro das roscas produzidas nas buchas escoadas, medido na região da espessura da chapa, apresentou o valor médio de 12,08 mm para o fundo do filete da rosca, tendo o filete da rosca altura médio de 0,95 mm, equivalente à altura apresentada pelos filetes de uma rosca M12 normal.



a) Bucha escoada b) Bucha escoada e roscada

Figura 107 – Perfil da bucha escoada (a) e escoada e roscada (b) produzida em chapa com espessura de 2,65 mm.



a) Bucha escoada b) Bucha escoada e roscada

Figura 108 – Perfil da bucha escoada (a) e escoada e roscada (b) produzida em chapa com espessura de 4,75 mm.

5.8 Resistência das Buchas Roscadas

Foram realizados ensaios mecânicos de tração para a determinação da resistência máxima à tração das buchas roscadas e também da classe de resistência obtida pelas roscas confeccionadas em cada amostra.

5.8.1 Carga máxima de resistência à tração

A tabela 17 apresenta os valores das cargas máximas médias, $F_{K \text{ Max MED}}$, apresentadas pelas buchas roscadas em todas as amostras, e o seu respectivo desvio-padrão, σ .

Tabela 17 – Carga máxima média de resistência à tração das buchas roscadas nas amostras.

Amostra	Carga máxima média $F_{K \text{ Max MED}}$ [kN]
A215	30,16 $\sigma = 1,30$ kN
A224	30,96 $\sigma = 1,22$ kN
A233	31,40 $\sigma = 0,75$ kN
B215	28,24 $\sigma = 0,45$ kN
B224	28,73 $\sigma = 0,75$ kN
B233	29,01 $\sigma = 0,39$ kN
B415	77,38 $\sigma = 4,21$ kN
B424	75,41 $\sigma = 0,53$ kN
B433	77,11 $\sigma = 0,57$ kN
C415	73,69 $\sigma = 1,43$ kN
C424	71,37 $\sigma = 0,29$ kN
C433	73,25 $\sigma = 0,94$ kN

a) Influência dos parâmetros de trabalho

Analisando-se os resultados dos ensaios mecânicos de tração percebe-se

uma tendência das buchas roscadas nas amostras A233, B233, B433 e C433, obtidas com as condições mais severas de conformação (maior velocidade de avanço e menor rotação), de apresentarem valores ligeiramente mais elevados de carga máxima média que as buchas roscadas nas demais amostras de seus respectivos grupos.

Considerando-se na análise as elevadas dispersões apresentadas pelos valores das cargas máximas médias, $F_{K \text{ Max MED}}$, constata-se que os resultados apresentados pelas buchas roscadas de um mesmo grupo de amostras são estatisticamente iguais. Por exemplo, os valores das cargas máximas médias obtidas nas buchas roscadas do grupo A2 de amostras são iguais quando se considera o valor dos respectivos desvios-padrão. Assim sendo, a variação dos parâmetros de trabalho empregados na confecção das buchas escoadas não demonstra ter influência sobre a resistência máxima à tração.

b) Influência da espessura do material

Através dos dados constantes na tabela 17 verifica-se que a variação da espessura do material-base da amostra influencia de maneira significativa os valores das cargas máximas médias, $F_{K \text{ Max MED}}$, das buchas roscadas.

As buchas roscadas confeccionadas nas amostras com maior espessura de chapa apresentaram valores de cargas máximas médias superiores àqueles obtidos pelas buchas roscadas confeccionadas nas amostras com menor espessura. Comparando-se os resultados apresentados pelas buchas roscadas nas amostras B215 ($s = 2,65 \text{ mm}$) e B415 ($s = 4,75 \text{ mm}$), confeccionadas por parâmetros de entrada iguais e em materiais-base possuindo o mesmo teor de carbono, verifica-se que com a amostra B215 obtiveram-se valores de carga máxima média de 28,24 kN, enquanto com a amostra B415 obtiveram-se valores de carga máxima média de 77,38 kN.

c) Influência do teor de carbono

Os resultados encontrados para a carga máxima média, $F_{K \text{ Max MED}}$, não possibilitam a determinação de uma tendência da influência da variação do teor de carbono presente no material-base das amostras.

Para as chapas com espessura de 2,65 mm, a tendência de influência se dá no sentido do aumento das cargas máximas médias com o aumento do teor de

carbono. Analisando-se os valores obtidos nas amostras A233 (0,13% de C) e B233 (0,04% de C), confeccionadas com os mesmos parâmetros de entrada e espessura de material, verifica-se que a primeira atingiu valores de cargas máximas médias, $F_{K \text{ Max MED}}$, de 31,40 kN, enquanto a segunda atingiu valores de 29,01 kN. Porém, considerando-se os desvios-padrão dos valores, verifica-se que as cargas máximas médias são estatisticamente iguais.

A variação do teor de carbono do material-base das amostras confeccionadas a partir de chapas com espessura de 4,65 mm não apresentou influência sobre os resultados das cargas máximas médias, $F_{K \text{ Max MED}}$, sendo os valores obtidos estatisticamente iguais.

5.8.2 Classe de resistência

A tabela 18 apresenta a classe de resistência alcançada pelas roscas das buchas confeccionadas em cada amostra, e as cargas de teste empregadas nos ensaios de classificação, segundo a norma DIN 267 – parte 4.

Tabela 18 – Classes de resistência obtidas pelas buchas roscadas.

Amostra	Carga de Teste empregada [kN]	Classe de Resistência atingida
A215	42,10	--
A224	42,10	--
A233	42,10	--
B215	42,10	--
B224	42,10	--
B233	42,10	--
B415	67,00	8
B424	67,00	8
B433	67,00	8
C415	67,00	8
C424	67,00	8
C433	67,00	8

A partir dos resultados obtidos observa-se que todas as roscas das buchas confeccionadas a partir de chapas com espessura de 2,65 mm (grupo de amostras

A2 e B2) não puderam ser classificadas, enquanto as roscas das buchas dos grupos de amostras B4 e C4 (espessura $s = 4,75$ mm) foram classificadas como classe 8.

Segundo a norma DIN 267 – parte 4, a menor classe de resistência na qual uma rosca M12 normal pode ser enquadrada é como classe 5, sendo que esta apresenta como carga de teste o valor de 42,10 kN.

Mesmo para este limite inferior de classificação, as roscas das buchas dos grupos A2 e B2 não lograram sucesso, apresentando rompimento do material da chapa a partir da base inferior da bucha (junção da rebarba inferior com a superfície inferior da chapa) sem que ocorresse o rompimento dos filetes da rosca. Ou seja, as roscas das buchas destes grupos de amostras são limitadas pela resistência do material-base, e não pela resistência dos filetes.

A figura 109 apresenta uma seqüência de macrografias da bucha roscada na amostra A233, mostrando o seu comportamento frente à solicitação efetuada.

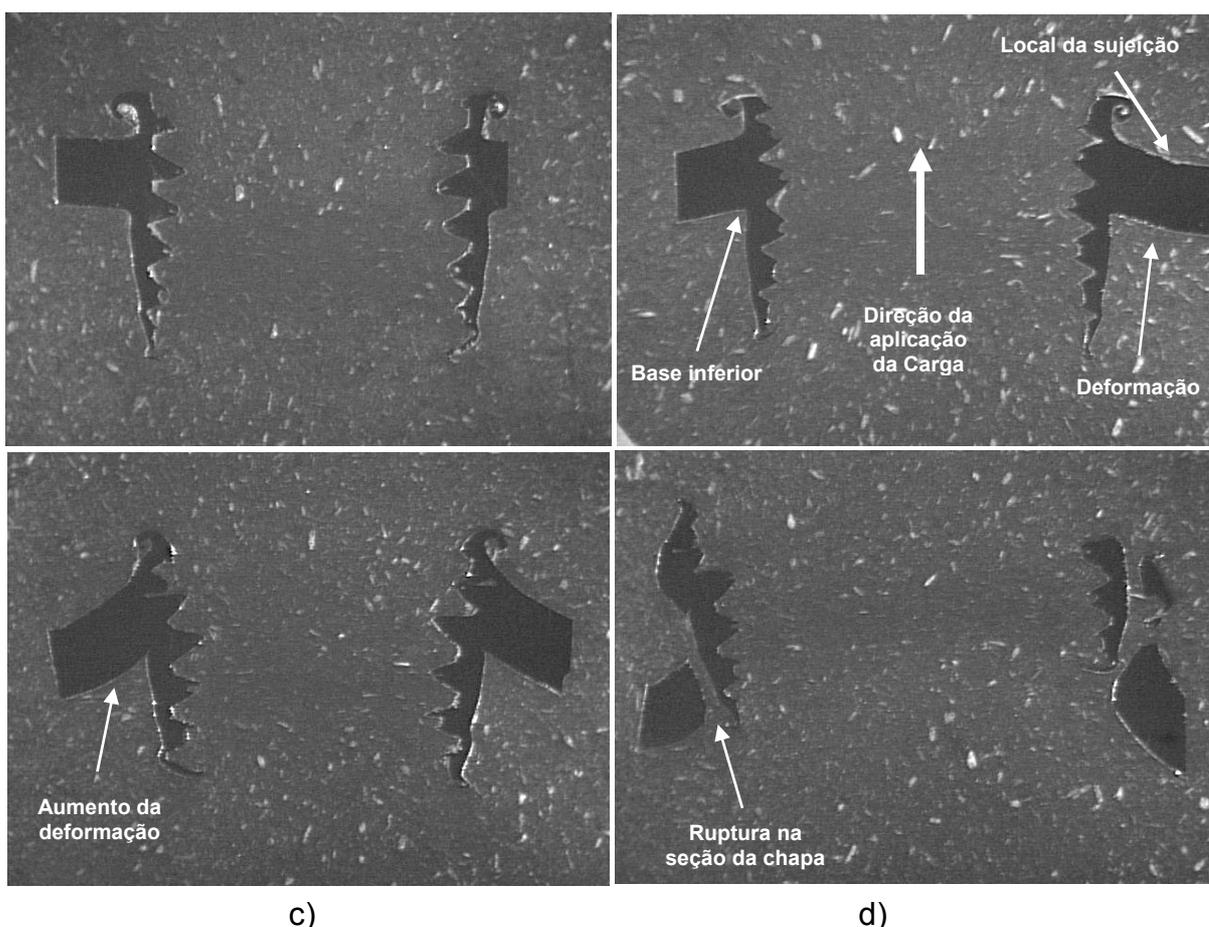


Figura 109 – Macrografias da bucha roscada na amostra A233. (a) Seção da bucha roscada, sem aplicação da carga. (b), (c) Aumento das deformações permanentes em função da carga aplicada. (d) Bucha roscada rompida. Somente polidas.

A figura 109a mostra a seção da bucha roscada ainda sem a incidência da carga de tração. Na figura 109b, em função da aplicação da carga, percebem-se deformações permanentes na base inferior da bucha e no local de contato com o dispositivo de sujeição. Na figura 109c observa-se que, em função da continuidade da aplicação da carga de tração, as deformações permanentes são mais pronunciadas e, posteriormente, ocorre a ruptura na seção do corpo de prova, conforme mostrado na figura 109d.

5.9 Avaliação Teórica da Resistência da Rosca

A alteração no comportamento do desenvolvimento do cisalhamento apresentado pelas buchas roscadas nas amostras quando estas são submetidas à esforços de tração, conduziram a uma avaliação teórica da resistência destas através da realização de cálculos de resistência dos materiais e da aplicação de métodos numéricos.

5.9.1 Cálculo da resistência

A resistência teórica das roscas das buchas é obtida através da determinação da resistência ao cisalhamento dos filetes, onde a carga aplicada é distribuída pelo menos sobre três filetes completos [98,99]. Foram realizados cálculos de resistência das buchas roscadas obtidas nas chapas com espessura de 2,65 e 4,75 mm empregadas nos ensaios, onde considerou-se a carga como sendo aplicada sobre a raiz dos filetes das roscas.

O cálculo da resistência teórica sobre a seção transversal da chapa foi realizado considerando-se a seção junto à base inferior da bucha, local onde ocorrem as maiores deformação durante o ensaio à tração.

As tensões de cisalhamento (τ) na raiz dos filetes e na seção da chapa podem ser determinadas pelas equações 17 e 18, respectivamente.

$$\tau = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot r_r \cdot b_r} \quad [\text{MPa}] \quad (17)$$

onde:

Q = carga [N];

n = número de filetes considerados;
 r_r = raio até raiz dos filetes [mm];
 b_r = espessura da raiz do filete [mm].

$$\tau = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r_s \cdot s} \quad [\text{MPa}] \quad (18)$$

onde:

Q = carga [N];

r_s = raio até seção da chapa [mm];

s = espessura da chapa [mm].

Os cálculos das tensões de cisalhamento teóricas desenvolvidas na raiz dos filetes da rosca e na seção das chapas constam no anexo G. Na tabela 19 apresentam-se os resultados dos cálculos realizados.

Tabela 19 – Tensões de cisalhamento teóricas desenvolvidas na raiz dos filetes e na seção das chapas.

Espessura da chapa, s [mm]	Tensão de cisalhamento, τ [MPa]	
	na raiz dos filetes	na seção da chapa
2,65	238	376
4,75	282	311

Analisando-se os resultados apresentados na tabela 19 verifica-se que, independente da espessura da chapa, as maiores tensões cisalhantes foram encontradas nas seções das chapas. Deste modo, para ambas as espessuras de chapa empregadas a tendência é que ocorra o cisalhamento na raiz dos filetes, devido a estes apresentarem valores de tensão de cisalhamento inferiores aos da seção da chapa.

5.9.2 Simulação numérica

Para a realização da simulação numérica da resistência das roscas, os perfis das buchas roscadas em ambas as espessuras de chapa foram digitalizados, compatibilizados e posteriormente transferidos para o software de elementos finitos

ANSYS, versão 7.1.

Através dos ensaios mecânicos de tração realizados obteve-se a curva de tensão real x deformação real dos materiais empregados nos ensaios, cujos valores são considerados durante a simulação. Os materiais são considerados elasto-plásticos [57], e a aplicação da carga foi considerada de forma axissimétrica, isto é, no centro da bucha.

A figura 110 apresenta as curvas de tensão real x deformação reais obtidas a partir dos dados dos ensaios mecânicos de tração realizados nas chapas. Através das curvas pode-se verificar o comportamento dos materiais quanto ao encruamento. Os parâmetros empregados na simulação estão listados na tabela 20.

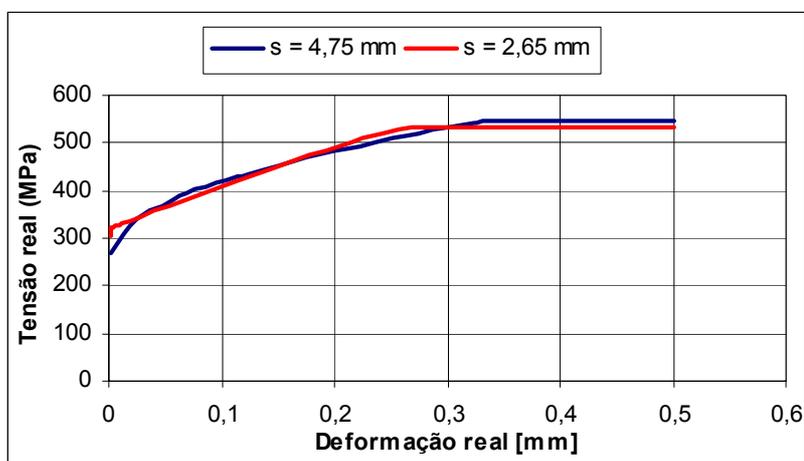


Figura 110 – Gráfico da tensão real x deformação real dos materiais.

Tabela 20 – Parâmetros empregados nas simulações.

s (mm)	E (GPa)	ν	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ_u	Q (kN)
4,75	210	0,3	270	544	0,345	67
2,65	210	0,3	305	533	0,284	42,1

s – espessura da chapa; E – módulo de elasticidade; ν – coeficiente de Poisson; σ_y – tensão limite de escoamento; σ_u – tensão real máxima no ensaio; ϵ_u – deformação correspondente a σ_u ; Q – carga aplicada.

Percebe-se, através dos dados da tabela 20, que a chapa de maior espessura (4,75 mm) possui uma tensão de escoamento, σ_y , menor, mas apresenta melhor desempenho quanto ao encruamento que a chapa com espessura de 2,65 mm, a partir de deformações reais acima de 0,3 mm (figura 108).

a) Chapa com espessura de 4,75 mm

A figura 111 mostra a distribuição da tensão equivalente de von Mises no corpo da bucha roscada, determinada através da equação 19 [55,57,99], sendo o material considerado como elástico. Percebe-se que as tensões geradas no corpo da bucha roscada são superiores à tensão de escoamento do material.

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad [\text{MPa}] \quad (19)$$

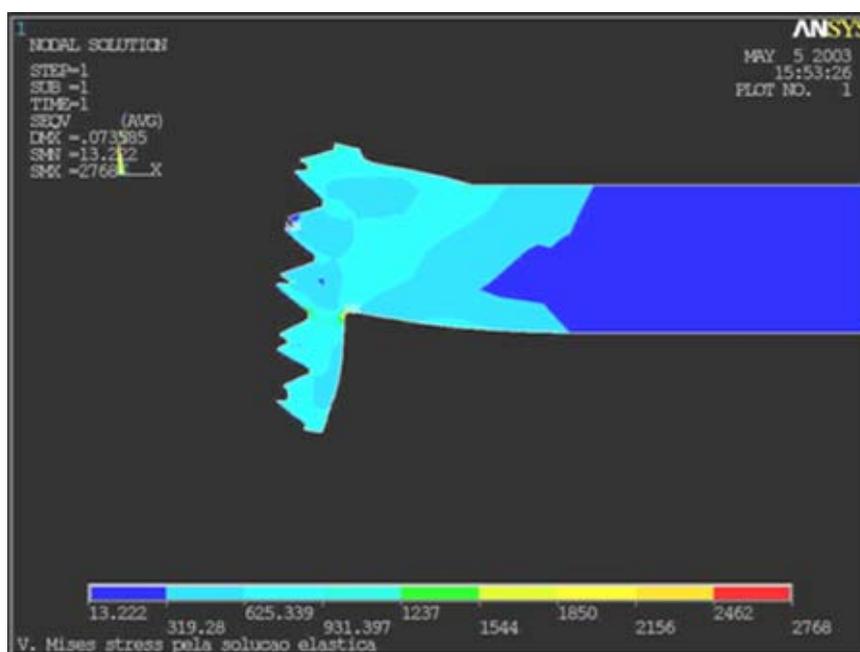


Figura 111 – Distribuição da tensão equivalente na bucha roscada ($s = 4,75$ mm).

As figuras 112 a 115 apresentam os resultados obtidos pela análise elasto-plástica, correspondendo a 59% da carga total, ou seja, 39,5 kN. A carga é distribuída uniformemente em 4 filetes. O deslocamento máximo atingido alcançou 1,25 mm (figura 112). Na base inferior da bucha (junção da rebarba inferior e da superfície inferior da chapa) a tensão atinge seu valor máximo (cor vermelha na figura 113) e apresenta tendência de se desenvolver através da seção da chapa, em torno dos filetes (cor marrom). Este comportamento indica que, se a carga continuar aumentando, poderá ocorrer o cisalhamento dos filetes da rosca.

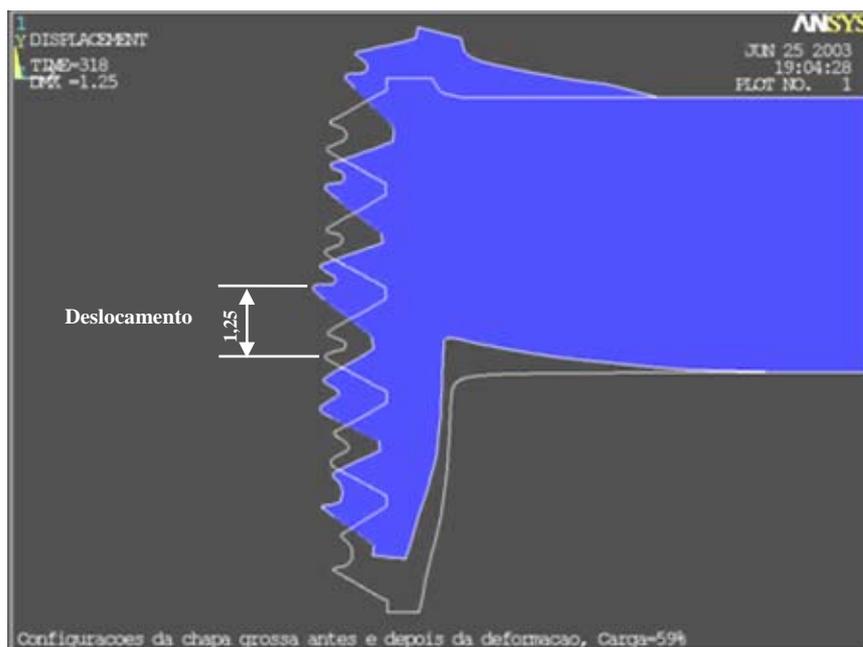


Figura 112 – Deslocamento ocorrido na bucha roscada ($s = 4,75$ mm).

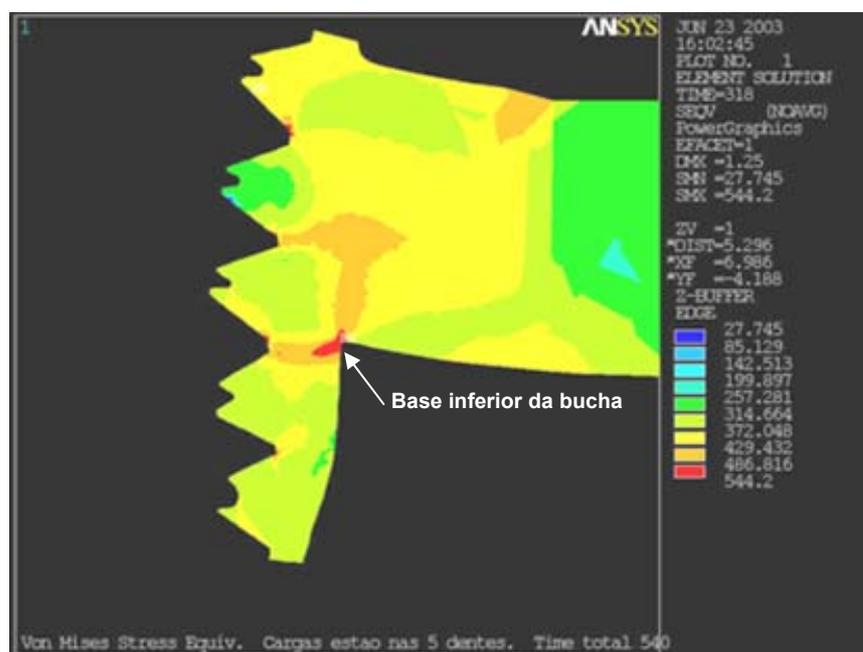


Figura 113 – Tensões desenvolvidas na bucha roscada ($s = 4,75$ mm).

Como consequência das distorções ocorridas nos elementos da malha, principalmente na base inferior da bucha escoada, a carga aplicada atingiu somente 59% da carga real. Estas distorções podem ser verificadas acompanhando-se a alteração da forma dos elementos da malha durante a simulação. No início da

aplicação da carga os elementos retangulares da malha situados em torno da base inferior da bucha têm o seu comprimento orientado de forma circunferencial (figura 114). Com a continuidade da aplicação do carregamento os elementos retangulares alteram sua forma em função da deformação gerada na malha, apresentando comprimento orientado de forma radial (figura 115), possibilitando o surgimento de elementos da malha com valor nulo de área. Em decorrência das áreas nulas e da versão do programa ANSYS empregado não permitir a geração automática de novas malhas durante o decorrer da deformação, a simulação foi interrompida.

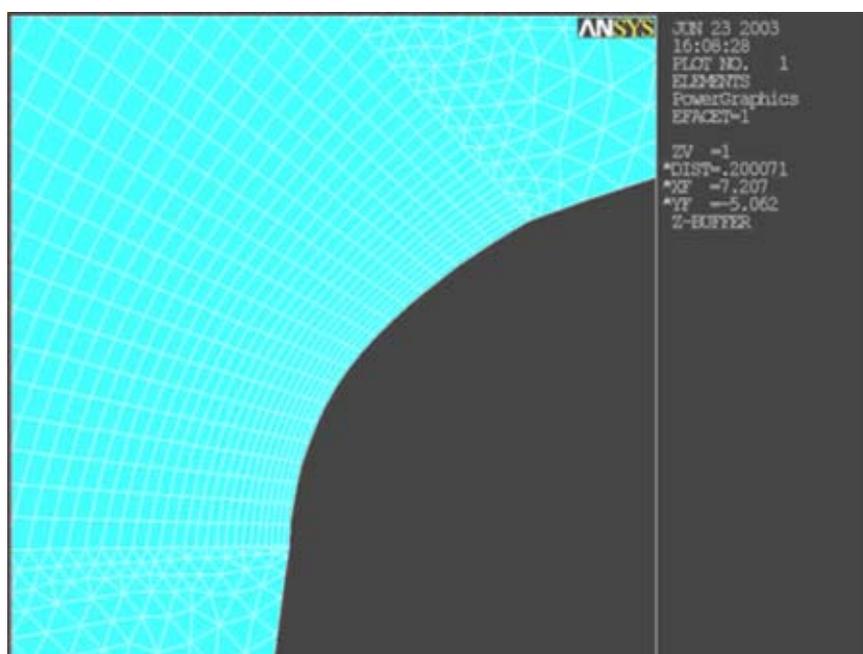


Figura 114 – Detalhe dos elementos da malha original na região da base inferior da bucha, antes da aplicação da carga.

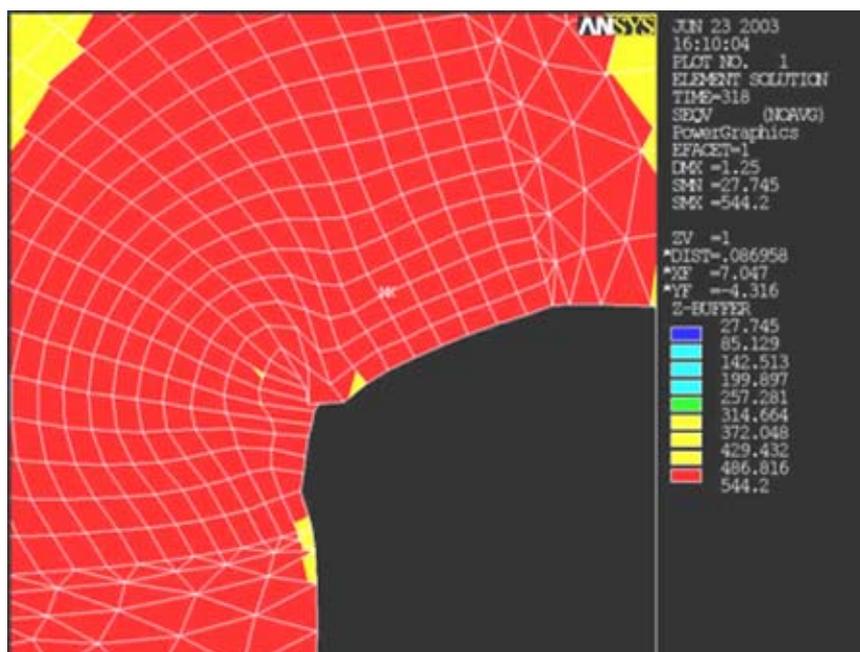


Figura 115 – Deformação dos elementos da malha e concentração de tensão na região da base inferior da bucha.

b) Chapa com espessura de 2,65 mm

Por razão idêntica àquela apresentada na simulação do carregamento da bucha roscada na chapa com espessura de 4,75 mm, a carga máxima somente atingiu 39% da carga aplicada. Correspondendo a essa carga, o deslocamento máximo atingido foi de 1,88 mm (figura 116).

Diferentemente da chapa com espessura de 4,75 mm, nesta simulação percebe-se que a tensão máxima de von Mises não ocorre somente na base inferior da bucha, mas também na região correspondente ao local de contato do dispositivo de sujeição empregado nos ensaios mecânicos de tração (cor vermelha na figura 117). Há duas regiões de tensões elevadas (cor marrom) localizadas nas superfícies superior e inferior da chapa, e na região de contato com o dispositivo. Se a carga aplicada continuasse a aumentar, certamente as tensões se desenvolveriam por toda secção da chapa. Isto indica que o cisalhamento não ocorrerá nos filetes da rosca, mas sim ocorrerá o cisalhamento da chapa na região de contato com o dispositivo de sujeição. As deformações ocorridas na malha são apresentadas na figura 118.

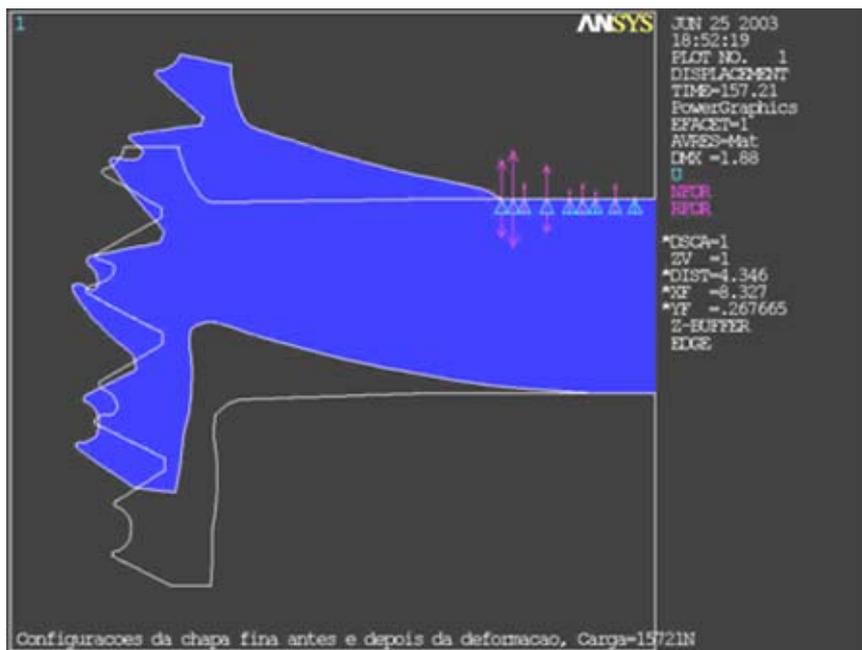


Figura 116 – Deslocamento ocorrido na bucha roscada ($s = 2,65 \text{ mm}$).

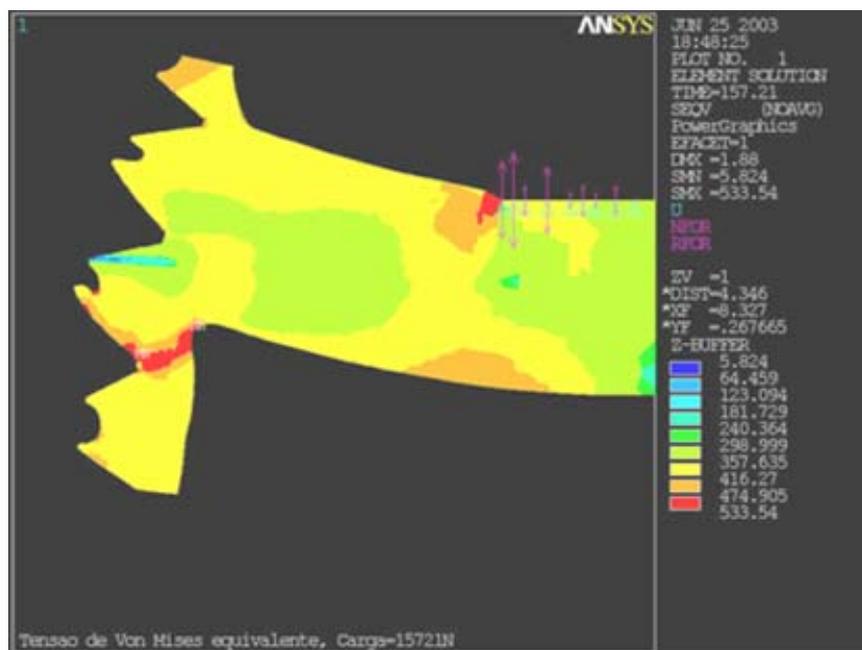


Figura 117 – Tensões desenvolvidas na bucha roscada ($s = 2,65 \text{ mm}$).

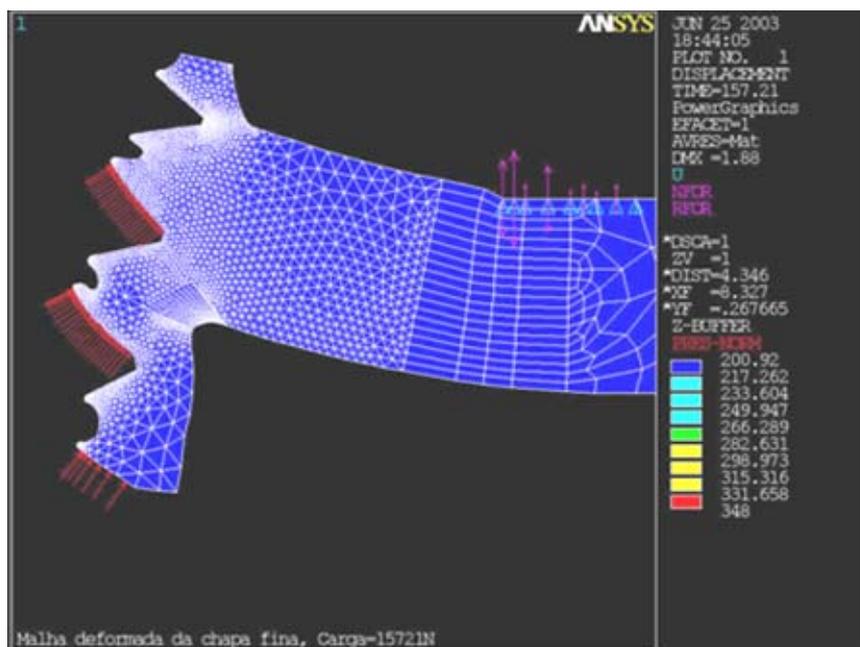


Figura 118 – Deformações na malha em função do carregamento.

Para superar o problema da distorção que ocorre na malha durante a simulação, podem ser empregados softwares que possuam a função de “remalhar”. No mercado existem softwares com essa função incorporada, um exemplo são os softwares de simulação dedicados para a área de conformação.

Outra maneira de melhorar os resultados da simulação numérica seria considerar a colocação de um parafuso na bucha roscada. A introdução do parafuso na bucha roscada poderia impedir o deslocamento dos filetes da rosca, possibilitando que a carga fosse distribuída por uma quantidade maior de material na região do corpo da bucha, aumentando a carga aplicada durante a simulação. Esse método normalmente apresenta dificuldades de cálculo e tempos elevados para execução da simulação, pois envolve o problema de contato entre corpos e ainda uma elevada não-linearidade física e geométrica. Contudo, seria possível realizar uma simulação completa do comportamento da bucha roscada (100% de carga aplicada).

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Relação entre o Processo e suas Características

6.1.1 Esforços e potência na furação

O aumento da velocidade de avanço ocasiona um aumento na taxa de deformação imposta, acarretando uma diminuição do tempo de contato entre a ferramenta e o material [2,5,22]. Essa redução no tempo de contato se reflete em uma menor introdução de energia mecânica no processo, resultando em menores níveis de temperatura na região de deformação, levando a reduções pouco significativas do limite de escoamento do material. Deste modo, são necessários maiores esforços e maior potência para a confecção da bucha escoada [56,99].

Quando são conjugadas rotações elevadas e baixas velocidades de avanço, a ferramenta permanece mais tempo em contato com o material da chapa, elevando os níveis de energia introduzidos e, por consequência, a temperatura na região de trabalho. Deste modo, o material tem reduzidas a sua dureza e a sua resistência à deformação, aumentando sua plasticidade e permitindo maior deformação com o emprego de forças de avanço, momentos torçores e potências menores [1,21,22].

Como apresentado na tabela 8 (item 5.1), as amostras confeccionadas a partir de chapas com espessura $s = 2,65$ mm e com as maiores velocidades de avanço (300 mm/min) acarretaram aumentos de até 42% na força de avanço máxima, $F_{fmáx}$, de até 136% no momento torçor máximo, $M_{tmáx}$, e de até 45% (amostra A233) na potência, P , necessária, em virtude das menores temperaturas e maiores taxas de deformação geradas. Nas amostras obtidas de chapas com espessura de 4,75 mm os percentuais de aumento foram de até 93% na força de avanço máxima, de até 124% no momento torçor máximo e de até 39% na potência (amostra B433).

Por apresentarem os maiores tempos de processo e as maiores temperaturas máximas médias, $T_{MÁX.méd}$, as amostras confeccionadas com as rotações mais elevadas (5000 min^{-1}) atingiram os níveis mais baixos de força de avanço máxima, $F_{fmáx}$, momento torçor máximo, $M_{tmáx}$, e potência necessária, P . Para amostras

obtidas a partir de chapas com 2,65 mm de espessura, que atingiram valores de temperatura máxima média de 969°C, o aumento da rotação e a diminuição da velocidade de avanço permitiu reduções de até 30% na força de avanço máxima, de até 57% no momento torçor máximo e de até 31% na potência (amostra A215). Nas amostras confeccionadas a partir de chapas com espessura de 4,75 mm, que atingiram valores de temperatura máxima média de 1086°C, verificaram-se reduções de até 48% para a força de avanço máxima, de até 55% no momento torçor máximo, e de até 28% para a potência (amostra B415).

As temperaturas mais elevadas alcançadas pelas amostras confeccionadas em chapas com espessura de 4,75 mm, não impediram que estas alcançassem os maiores valores dos esforços e da potência necessária à conformação da bucha. Estes valores mais elevados ocorrem porque, com relação às chapas de 2,65 mm de espessura, as chapas mais espessas possuem maior seção transversal e, por consequência, uma maior rigidez, um maior volume de material a ser deformado e maior área de contato, gerando valores de força de avanço máxima, momento torçor máximo e potência mais elevados em virtude da maior resistência encontrada pela ferramenta de furação [2,5,21,22,34].

Comparando-se os resultados apresentados na tabela 8 em amostras confeccionadas a partir de chapas contendo teores de carbono semelhantes, as amostras de maior espessura apresentaram valores de força de avanço máxima variando entre 14% (amostra C415) e 68% maiores (amostra B433). O momento torçor máximo variou de 69% para a amostra C433 até 95% para as amostras B415 e C415, e em consequência, a potência alcançou valores entre 75% – amostra C433 – e 109% maiores – amostra C415.

Assim como a variação da espessura do material, as características mecânicas dos materiais trabalhados também influem sobre os valores dos esforços e da potência necessária. Na furação por escoamento os materiais que apresentam valores mais elevados de dureza e de resistência mecânica normalmente levam a maiores esforços sobre a ferramenta e consomem maior potência para a conformação da bucha [1,5,22].

Como mostrado no item 5.1.3, as amostras obtidas a partir de materiais contendo teores mais elevados de carbono em sua composição (A2 = 0,13% C, e C4 = 0,11% C) apresentaram valores de força de avanço máximos mais elevados que as amostras contendo menor teor de carbono (B2 = 0,04% C, e B4 = 0,04% C).

Em virtude das temperaturas máximas médias, $T_{MÁX.méd}$, atingidas pelas amostras alcançarem patamares semelhantes (tabela 11, item 5.3), os valores da força de avanço máxima não apresentaram diferenças significativas entre amostras confeccionadas com parâmetros de processo idênticos. Comparando-se as amostras obtidas a partir de materiais com espessura $s = 2,65$ mm, nas amostras contendo teor de carbono de 0,13% atingiram-se valores de força de avanço máxima até 20% mais elevadas (amostra A233), enquanto nas amostras obtidas a partir de materiais com espessura $s = 4,75$, contendo teor de carbono de 0,11%, atingiram-se valores 10% maiores (amostra C415).

O momento torçor, característica do processo fortemente dependente da temperatura do material, da área de contato entre o material e a ferramenta e de adesões na ferramenta [5,22], apresentou comportamento inverso. Materiais possuindo menor teor de carbono em sua composição química (grupos B2 e B4) atingiram valores maiores ou no mínimo iguais para o momento torçor máximo, em comparação com os materiais de maior teor de carbono (tabela 8). Como as chapas de mesma espessura apresentam áreas de contato entre material e ferramenta iguais e também geram temperaturas semelhantes para parâmetros de trabalho idênticos, os valores mais elevados de momentos torçores máximos alcançados pelas chapas contendo menor teor de carbono podem ser resultantes de adesões de material do corpo de prova sobre a ferramenta durante a confecção da bucha.

Como variações encontradas nos momentos torçores máximos, para as chapas de 2,65 mm de espessura, as amostras contendo teor de carbono de 0,04% atingiram valores de momento torçor máximo até 4% mais elevadas (amostra B215) que as amostras contendo 0,13% de carbono. As amostras obtidas a partir de chapas de 4,75 mm de espessura contendo teores de carbono de 0,04% apresentaram maiores diferenças nos valores dos momentos torçores máximos, de até 14% (amostra B433).

Sendo dependente do momento torçor máximo, a potência apresentou comportamento semelhante a este, ou seja, valores iguais ou mais elevados nas chapas com menor teor de carbono (0,04%). Nas chapas com espessura de 2,65 mm, o maior valor de potência foi obtido na amostra B215, em torno de 9%, sendo que as demais apresentaram valores semelhantes. Nas chapas mais espessas (4,75 mm) a potência apresentou maior variação, onde foram atingidos valores de até 14% maiores nas amostras contendo menor teor de carbono (amostra B433).

6.1.2 Tempo de processo

Como mostrado na tabela 9 do item 5.2.1, para parâmetros idênticos de trabalho, as amostras obtidas a partir de chapas mais finas, com 2,65 mm de espessura, apresentaram tempos de processo até 4% maiores em comparação com as amostras obtidas a partir de chapas mais espessas, com 4,75 mm.

A diminuição no tempo de processo se deve ao menor comprimento de furação necessário para a obtenção da bucha escoada nas chapas mais espessas. Em função do maior volume de material deslocado, a bucha formada possui rebarba superior com maior altura. Deste modo, durante o processo de conformação da bucha, a ferramenta percorre um comprimento de furação menor até que o colar conformador da ferramenta toque e conforme o material que ascende para formar a rebarba superior, e obtenha uma base adequada para apoio de elementos de junção.

6.1.3 Trabalho de conformação

O trabalho de conformação representa a quantidade de energia mecânica introduzida no processo. A rotação é responsável pela maior parcela de energia fornecida e o tempo de aplicação da energia depende da velocidade de avanço empregada [1,5,34,36,37].

Como pode ser verificado pelos resultados das tabelas 9 e 10, as amostras confeccionadas com as maiores rotações e menores velocidades de avanço - $n = 5000 \text{ min}^{-1}$ e $v_f = 100 \text{ mm/min}$, respectivamente - apresentaram os níveis mais elevados de trabalho total de conformação, W_F , em virtude de receberem maior quantidade de energia mecânica, por um tempo mais longo.

As amostras com espessura $s = 2,65 \text{ mm}$ confeccionadas por esses parâmetros apresentaram valores de trabalho total 93% maiores que as amostras confeccionadas com as menores rotações, enquanto as amostras com espessura $s = 4,75 \text{ mm}$ apresentaram valores 109% maiores, para um tempo de processo 200% maior.

Como mostrado na tabela 10, para amostras de iguais teores de carbono confeccionadas com os mesmos parâmetros de trabalho, as de maior espessura

introduziram maior quantidade de energia mecânica no processo, gerando valores de trabalho total de conformação entre 63% (amostra B433) e 84% maiores (amostra C415). Apesar de apresentarem tempos de processo até 3% menores (tabela 9), os maiores níveis de energia mecânica introduzidos se devem aos maiores momentos torçores apresentados por essas amostras (tabela 8).

Segundo a tabela 10, os valores de trabalho de conformação total apresentados pelas amostras não demonstraram claramente a influência do teor de carbono nelas contido. Observa-se que, para as amostras com espessura de 2,65 mm, aquelas contendo menor teor de carbono (B2 – 0,04% C) apresentaram valores ligeiramente superiores, em torno de 2% (amostra B233), o que pode ser resultado dos valores de momentos torçores ligeiramente maiores apresentados nessas amostras.

Da mesma forma, para as amostras de maior espessura, os valores de trabalho de conformação total não apresentaram grandes variações com a variação do teor de carbono. Neste caso, nas amostras com maior teor de carbono (0,11% C) verificou-se a introdução de uma parcela mais elevada de energia no processo em comparação às amostras com menor teor de carbono (0,04%), sendo sua variação pouco expressiva, de no máximo 8% (amostra C433). O trabalho de rotação, W_R , que corresponde a cerca de 99% do trabalho total de conformação, W_F , é determinado pela integração dos valores do momento torçor em função da rotação e do tempo [1,2,34]. As amostras do grupo C4 introduzem maior quantidade energia mecânica durante a conformação da bucha, apesar de gerarem um valor de momento torçor máximo menor que as amostras do grupo B4. Isto ocorre porque o trabalho de rotação, W_R , é maior nas amostras do grupo C4, em função de que nessa amostra foram obtidos momentos torçores elevados em maior quantidade durante a conformação da bucha.

6.1.4 Temperatura

Como pode ser verificado na tabela 11 do item 5.3, as maiores temperaturas máximas médias, $T_{MÁX.méd}$, foram obtidas nas amostras A215, B215, B415 e C415, as quais se situaram acima de 950°C. Para o mesmo comprimento de furação, os parâmetros de trabalho empregados para estas amostras ($n = 5000 \text{ min}^{-1}$ e $v_f = 100 \text{ mm/min}$) ocasionam um maior tempo de processo e um maior tempo de contato

entre a ferramenta e o material da chapa, gerando valores mais elevados de trabalho de deformação. Estes valores mais elevados de trabalho de deformação introduzem uma parcela maior de energia mecânica, que resultam em um maior aquecimento do material [1,5,22,23].

Nas demais amostras, a temperatura máxima média atingiu valores inferiores, em função de empregarem velocidades de avanço maiores e rotações menores. Essa combinação de parâmetro de trabalho não possibilita um aquecimento elevado do material na região de deformação, devido à rapidez com que é conformado e pela menor introdução de energia através do trabalho de rotação [1,22].

Com o aumento da espessura das chapas tem-se, durante a conformação da bucha, um aumento na área de contato entre material e ferramenta, e um maior volume de material sendo deslocado, ocasionando trabalhos de conformação mais elevados [34]. Essas condições de conformação acabam introduzindo maior quantidade de energia no processo, conduzindo a maiores níveis de temperatura na região de trabalho [22]. Desta forma, a temperatura máxima média mais elevada atingida nas amostras com espessura de 2,65 mm (A2 e B2) alcançou 969°C (amostra A215), enquanto nas amostras com 4,75 mm de espessura a temperatura máxima atingiu 1086°C (amostra B415).

Em função das amostras não apresentarem diferenças significativas no teor de carbono presente no material, não foi possível definir a sua influência na temperatura máxima média, como pode ser verificado pelos valores constantes na tabela 11. Verifica-se que as amostras de menor espessura (A2 e B2) apresentam um comportamento semelhante quando conformadas com os mesmos parâmetros de trabalho, obtendo-se variações em torno de 2% nos valores da temperatura máxima média. Entre as amostras de maior espessura (B4 e C4) ocorreram maiores variações, onde as diferenças de temperatura máxima média, $T_{MAX.méd}$, atingiram no máximo 10%.

Como mostrado no item 5.3, os valores do gradiente de aquecimento, $\Delta T1_{AQUEC.méd}$, que são relativos ao período que compreende o início do processo até a temperatura de referência de 650°C, são significativamente maiores em comparação com os valores do gradiente de aquecimento $\Delta T2_{AQUEC.méd}$, que representam o comportamento da temperatura a partir da temperatura de referência (650°C) até a temperatura máxima média atingida nas amostras.

No intervalo de tempo considerado para o gradiente de aquecimento,

$\Delta T_{1\text{AQUEC.méd}}$, ocorre uma rápida elevação da temperatura em virtude do elevado calor gerado simultaneamente por atrito, pela ponta da ferramenta, e por deformação plástica, pela parte cônica da ferramenta.

O gradiente de aquecimento, $\Delta T_{2\text{AQUEC.méd}}$, refere-se à etapa de passagem da parte cilíndrica da ferramenta pela bucha, onde o calor gerado principalmente pelo atrito mantém a temperatura elevada na região de deformação, mas adiciona pouca energia ao material, até a conformação da rebarba superior da bucha escoada, realizado pelo anel conformador da ferramenta, onde ocorre nova introdução de energia capaz de elevar a temperatura do material aos valores da temperatura máxima.

Analisando-se o comportamento dos gradientes de temperatura das amostras, percebe-se basicamente a influência das condições de conformação empregadas.

Duarte Filho [1] verificou em seus ensaios que um incremento na rotação de 3000 min^{-1} para 6000 min^{-1} , apesar de promover um aumento da temperatura máxima, gera gradientes de aquecimento equivalentes. Em seus ensaios os gradientes de aquecimento mais elevados foram encontrados em amostras que empregaram maiores velocidades de avanço, que causam intensa deformação no material, aquecendo-o rapidamente.

Em comparação com as demais amostras, as amostras A215, B215, B415 e C415 apresentaram os menores gradientes médios de aquecimento $\Delta T_{1\text{AQUEC.méd}}$ e $\Delta T_{2\text{AQUEC.méd}}$, e de resfriamento $\Delta T_{\text{RESF.méd}}$, como mostrado na tabela 11.

Com o aumento da velocidade de avanço e diminuição da rotação da ferramenta percebe-se um aumento nos valores dos gradientes de aquecimento. Para os ensaios realizados, a diminuição da rotação não deve ter promovido diminuições acentuadas no calor gerado, sendo esta diminuição compensada pela introdução de maior energia através das elevadas deformações do material oriundas do aumento da velocidade de avanço. A maior diferença no gradiente de aquecimento $\Delta T_{1\text{AQUEC.méd}}$ ocorreu entre as amostras B415 e B433, que alcançou 112% e, no gradiente de aquecimento $\Delta T_{2\text{AQUEC.méd}}$ a maior diferença ocorreu entre as amostras B215 e B233, com um valor de 130%.

Destaca-se o comportamento das amostras A224 e B224, que apresentaram valores de gradientes médios de aquecimento, $\Delta T_{1\text{AQUEC.méd}}$, maiores que as dos

seus respectivos grupos, comportamento este que não se repetiu para as amostras B424 e C424. Para as primeiras, o aumento da velocidade de avanço combinado com a diminuição da rotação possivelmente tenha proporcionado, para essa relação de diâmetro de ferramenta e espessura de chapa, uma introdução mais otimizada de energia através da deformação plástica e do atrito, elevando mais rapidamente a temperatura na região de deformação.

Comparando-se os valores dos gradientes de aquecimento encontrados para as duas espessuras de chapa ensaiadas (2,65 mm e 4,75 mm), percebe-se que as amostras com maior espessura atingiram gradientes de aquecimento, $\Delta T_{1\text{AQUEC.méd}}$, menores nas amostras B415 e C415, provavelmente em função de serem os gradientes de aquecimento médios determinados no mesmo intervalo de temperaturas, e também devido ao local de medição de temperatura estar situado a uma distância maior (maior espessura da chapa). As amostras B433 e C433 apresentaram valores semelhantes de gradiente de aquecimento, $\Delta T_{1\text{AQUEC.méd}}$, se forem consideradas as dispersões. Os maiores valores apresentados pelos gradientes de aquecimento $\Delta T_{2\text{AQUEC.méd}}$ nas amostras mais espessas estão relacionados aos maiores valores de temperaturas máximas geradas nessas amostras, e também ao menor tempo de processo.

Na comparação entre os grupos de amostras A2 e B2, e B4 e C4, observa-se uma semelhança na evolução dos gradientes de aquecimento médio em função da dispersão apresentada pelos valores, indicando haver pouca influência do teor de carbono nesta etapa do processo.

Os gradientes de resfriamento médios apresentam uma tendência de aumentarem com o aumento da velocidade de avanço e diminuição da rotação. Deste modo, as amostras A233, B233, B433 e C433 apresentaram os maiores gradientes de resfriamento, chegando a atingir valores até 70% mais elevados que as demais amostras.

Com o aumento da velocidade de avanço, o tempo de aquecimento do material é reduzido. Como consequência, o calor gerado se concentra na região de deformação, sendo que o material adjacente (mais distante da borda da bucha) aquece pouco enquanto o processo se desenvolve. Deste modo ao final do processo, quando a ferramenta é retirada, a condução do calor para o material da chapa ocorre com maior velocidade do que quando se empregam menores

velocidades de avanço e maiores rotações, pois essas condições promovem um maior aquecimento do material adjacente a borda da bucha.

Os resultados obtidos na medição da temperatura gerada durante a furação por escoamento, apesar das variações encontradas, permitem seu relacionamento com a análise microestrutural. As variações provavelmente são conseqüências da dinâmica do processo e da fixação dos termopares nos corpos de prova.

6.1.5 Geometria e qualidade das buchas

De acordo com a tabela 12, a classificação obtida para a qualidade das rebarbas das buchas escoadas como pertencentes ao Grupo I demonstra que, para todas as espessuras e teores de carbono dos materiais empregados, os parâmetros de trabalho são adequados [1,2,24].

A conjugação das maiores rotações, n , e das menores velocidades de avanço, v_f , na conformação das buchas promoveu um maior aquecimento da região de deformação, induzindo a uma diminuição da dureza e do limite de escoamento do material. Deste modo, o material da chapa apresenta menor resistência para escoar junto com a ferramenta na direção axial obtendo-se buchas com maior comprimento de rebarba porém com paredes mais delgadas.

As amostras conformadas com as menores rotações e maiores velocidades de avanço apresentaram em geral valores mais favoráveis com relação à forma da bucha, com paredes mais espessas apesar de menos longas.

Comparativamente, por possuírem maior volume de material a ser deslocado, as chapas de maior espessura apresentaram buchas escoadas contendo rebarbas inferiores mais longas e com paredes mais espessas. As amostras com 4,75 mm de espessura, dependendo das condições de deformação empregadas, atingem valores de espessura de parede até 40% maiores. O comprimento não apresentou valores tão acentuados de diferença, pois como as buchas foram conformadas com a mesma ferramenta o comprimento das rebarbas é limitado pelo comprimento de furação possível. Deste modo os valores variaram menos, em torno de 10% maiores.

Os resultados da tabela 12 não evidenciam claramente a influência do teor de carbono do material sobre as dimensões da bucha escoada. Verifica-se que para os materiais contendo menor teor de carbono (grupo de amostras B2 e B4 – 0,04% C) as buchas apresentam paredes ligeiramente mais espessas, em torno de 3%

dependendo das condições de deformação empregados, e as amostras contendo maior teor de carbono (grupo de amostras A2 - 0,13% C, e C4 - 0,11% C) apresentam comprimentos em torno de 6% maiores. Esta característica das dimensões da bucha pode estar relacionada com uma maior flexão das chapas de menor teor de carbono no início do processo de conformação da bucha, em função de sua menor rigidez e por estarem sujeitas às maiores forças axiais. Em um dado instante da conformação da bucha, em função da penetração da ferramenta e aquecimento do material a seção resistente não mais suporta os elevados esforços, a velocidade de avanço empregada soma-se ao retorno da chapa apresentando, deste modo, uma velocidade de avanço instantânea maior. Com isso o material que está sendo conformado tem um menor tempo para se deslocar até a parte inferior da rebarba, gerando buchas com paredes mais espessas.

6.2 Relação entre as Características do Processo e a Microestrutura

O processo de furação por escoamento, durante a confecção da bucha, adiciona energia térmica e energia de deformação ao material na região de trabalho. Dependendo do nível de energia introduzido podem ser desencadeados fenômenos metalúrgicos, como recuperação, recristalização e mudanças de fase, que conduzem a alterações na microestrutura original do material.

Os materiais empregados nos ensaios foram utilizados como recebidos, isto é, não sofreram nenhum tipo de tratamento térmico antes dos ensaios. Como pode ser observado nas micrografias constantes na tabela 5 do item 4.4, e também nas micrografias da faixa C apresentadas nas figuras das amostras no item 5.5, os materiais apresentam microestrutura característica de um material ferrítico/perlítico laminado a quente, com tamanho de grão equiaxial pequeno e uniforme.

Durante o processo de furação por escoamento o material da chapa sofre a influência do calor gerado e da deformação imposta. Como mostrado na figura 78 do item 5.5, essa combinação de efeitos leva a alterações na estrutura do material, principalmente nas regiões adjacentes a borda da bucha (faixa A), mas também em regiões mais afastadas da borda (faixa B).

Evidenciam-se na faixa A, junto à borda da bucha, microestruturas compostas por grãos com menor diâmetro que aqueles dos metais-base, principalmente para as regiões compreendidas pela seção da chapa (regiões R1, R2 e R3). Essa redução

no diâmetro dos grãos indica a ocorrência de recristalização da estrutura original, nessa faixa, em função das deformações e temperaturas desenvolvidas durante a conformação da bucha. Além disso, a perlita aparece uniformemente distribuída, indicando que a região sofreu um aquecimento acima da temperatura A_{c3} , ocorrendo austenitização da estrutura original com dissolução do carbono.

Como mostrado nas tabelas 13 a 16, nas regiões superiores ocorreram os maiores refinamentos na estrutura, provavelmente em consequência de deformações mais elevadas e temperaturas localmente mais baixas que as demais regiões. Individualmente, as regiões intermediárias (região R2) têm a tendência de apresentarem grãos de diâmetros menores ou estatisticamente iguais aos da região mais superior (região R1) da bucha. Ao final do processo o material que ascendeu durante a conformação da bucha é deformado pelo anel conformador da ferramenta, formando a rebarba superior. Presume-se que a introdução adicional de energia que ocorre durante essa deformação possibilita aos grãos dessa região (região R1) crescerem mais que os da região imediatamente abaixo (região R2). Em comparação com as regiões superiores (regiões R1 e R2) da bucha, as regiões inferiores (regiões R3 e R4) apresentaram um menor refino de grão em virtude da menor intensidade de deformação imposta ao material da chapa pelo processo.

De maneira geral, a julgar pelas microestruturas e pelo fator de forma apresentados pelos grãos, a formação de estruturas aciculares se concentrou nas regiões inferiores das buchas, mas com maior intensidade nas rebarbas inferiores (região R4), como mostrado na figura 79. O aquecimento suficientemente alto nessas regiões possibilitou a formação de austenita, que em função do tempo de processo relativamente longo, favoreceu a transformação de boa parte da microestrutura, que com o rápido resfriamento levou à formação de estrutura acicular [1,101].

Também nessas regiões, nas amostras contendo maior teor de carbono (A2 e C4) e conformadas com as maiores rotações e com as menores velocidades de avanço (A215, A224, C415 e C424), pode-se identificar a formação de ferrita de Widmanstätten, como mostrado na figura 81. A ferrita de Widmanstätten se forma em temperaturas logo abaixo da temperatura de transformação da ferrita alotriomorfa, e normalmente nucleia nos contornos de grãos da austenita. A formação da ferrita de Widmanstätten é estimulada por resfriamentos acelerados na região de transformação e por tamanho de grão austenítico grosseiro [102-105]. O

crescimento da ferrita de Widmanstätten é retardado na austenita deformada plasticamente [105] e em aços com teores de carbono abaixo de 0,2% [103].

As amostras confeccionadas com as maiores velocidades de avanço e menores rotações ($v_f = 300$ mm/min e $n = 3000$ min⁻¹) apresentaram maiores refinamentos na estrutura, principalmente para as regiões compreendidas pela seção da chapa (regiões R1, R2 e R3). Tais estruturas são consequência direta das deformações mais severas e temperaturas máximas localmente menores com que estas amostras são deformadas, normalmente entre as temperaturas Ac1 e Ac3. Segundo a Quarta Lei da Recristalização, o tamanho de grão final depende (fortemente) do grau de deformação e (fracamente) da temperatura de recozimento. Quanto maior o grau de deformação e/ou menor a temperatura de recozimento, menor será o tamanho de grão final [51,60].

Comparando-se regiões iguais entre as amostras de menor espessura, as de maior teor de carbono (grupo de amostras A2 – 0,13% C) apresentaram estruturas compostas por grãos mais refinados do que as de menor teor de carbono (grupo de amostras B2 – 0,04% C) [106]. Mesmo sendo conformadas com as mesmas condições de trabalho e atingindo valores semelhantes de temperatura máxima e trabalho de conformação, a maior quantidade de carbono presente no material eleva o potencial termodinâmico para a recristalização por apresentar maior densidade de discordâncias e mais homoganeamente distribuída, que facilitam a nucleação da recristalização refinando a estrutura [61,107].

Na faixa B das amostras, região intermediária entre a região A e o material-base (figura 78), puderam ser identificadas estruturas que foram sujeitas a deformações elevadas, porém em temperaturas inferiores a Ac1.

Para essa faixa, a estrutura bandeada apresentada pelo material-base do grupo de amostras A2 permaneceu após a realização da furação, como mostrado nas figuras 79 e 80. Em consequência da temperatura localmente mais baixa não houve dissolução da perlita. A estrutura bandeada é formada em aços com teores de carbono entre 0,1 e 0,5%, durante o lingotamento, devido à microsegregação interdendrítica de elementos substitucionais, como o manganês, durante a solidificação [107,108].

Nos demais grupos de amostras (B2, B4 e C4) a perlita aparece mais distribuída na estrutura, como mostrado nas figuras 85, 88 e 92. Em regiões mais próximas da faixa A, em função de maior temperatura local gerada durante a furação

e velocidades de resfriamentos mais elevadas, algumas amostras apresentaram concentração de perlita em contornos de grãos, conforme figura 87. Durante o resfriamento a partir da região de transformação, os nódulos de perlita nucleiam nos contornos dos grãos austeníticos e crescem sobre estes. Para velocidades de resfriamento lentas abaixo de Ac_1 o número de nódulos de perlita que nucleiam é relativamente pequeno, e os núcleos crescem livremente. Para grandes velocidades de resfriamento a taxa de nucleação é mais elevada, gerando um grande número de núcleos que crescem juntos formando uma interface de perlita nos contornos de grão da austenita [52,109].

Com maior distanciamento da borda da bucha, a estrutura é composta por grãos alongados alinhados com a direção de deformação, indicando que na região ocorreram elevadas deformações, mas em temperaturas mais baixas. Junto a esses grãos alongados formaram-se pequenos grãos equiaxiais, como mostrado na figura 83. O aparecimento desta estrutura mista composta por grãos alongados e por grãos menores indica que a estrutura sofreu uma recristalização parcial, como consequência da grande deformação imposta à estrutura, apesar da temperatura relativamente baixa [22].

Em amostras obtidas a partir de material de maior espessura ($s = 4,75$ mm) e conformadas com as maiores velocidades de avanço ($v_f = 300$ mm/min) e as menores rotações ($n = 3000$ min⁻¹) observaram-se estruturas compostas por grãos alongados alinhados com a direção de deformação. Estes grãos não apresentaram redução de seu tamanho, ou seja, não houve recristalização da estrutura, mesmo que parcial. Nesta região as temperaturas não devem ter sido elevadas o suficiente para promoverem uma recristalização do material altamente deformado.

6.3 Relação entre a Microestrutura e as Propriedades Mecânicas

Durante a furação por escoamento, o trabalho termomecânico realizado sobre o material na região de trabalho promove alterações nas propriedades mecânicas de dureza e resistência à tração, através de mudanças na microestrutura original.

6.3.1 Microdureza

A borda das buchas escoadas apresenta os valores mais elevados de

microdureza, que se reduzem em direção ao material-base. Nesta região, que define a faixa A da zona termomecanicamente afetada (ZTA), ocorrem grandes alterações na estrutura original do material, formando-se estruturas compostas por grãos altamente refinados pela ocorrência de recristalização. Os maiores refinamentos na estrutura acontecem principalmente nas regiões superiores da bucha, compreendidas pelas regiões R1 e R2 (figura 78). Estes valores mais elevados de microdureza para a borda da bucha conferem com resultados encontrados na literatura [1,22,34].

Como mostrado nas figuras 95, 98, 101 e 102, a microestrutura mais favorável composta por um maior refinamento dos grãos presentes na ZTA (figuras 80 e 85 - micrografias A1 e A2) proporcionou uma maior elevação da microdureza nas amostras confeccionadas pelas maiores velocidades de avanço e menores rotações (amostras A233, B233, B433 e C433), quando comparados os valores de microdureza das demais amostras de seus respectivos grupos.

Para uma mesma amostra, as diferentes regiões da borda da bucha apresentam alteração nos valores de microdureza. Essa variação na microdureza é consequência das diferentes estruturas formadas na região deformada pelo processo de furação por escoamento. Deste modo foram observadas as seguintes situações:

- quando são empregadas as menores velocidades de avanço ($v_f = 100$ mm/min) e as rotações mais elevadas ($n = 5000 \text{ min}^{-1}$), as regiões inferiores da bucha (R3 e R4) tendem a apresentar maior dureza que as demais regiões (figura 94). Nestas regiões, a ZTA das buchas apresentou uma estrutura formada por grãos refinados com formato acicular que elevaram a dureza localmente (figura 81).

- quando são empregados parâmetros de trabalho intermediários ($v_f = 200$ mm/min e $n = 4000 \text{ min}^{-1}$), as regiões R2 e R3, que se localizam sobre a seção da chapa, tendem a apresentar os valores mais elevados de microdureza. A microestrutura destas regiões é composta por estruturas mistas de grãos aciculares e equiaxiais ligeiramente mais refinados (figura 90 – micrografia A2).

- quando são empregadas grandes velocidades de avanço ($v_f = 300$ mm/min) e menores rotações ($n = 3000$) as regiões superiores da bucha (R1 e R2) atingiram os maiores valores de microdureza (figura 102) quando comparadas às demais regiões, em virtude de apresentarem uma estrutura onde aparecem grãos altamente refinados (micrografias A1 - figuras 85 e 89).

Como consequência do maior refinamento ocorrido nas regiões superiores (R1 e R2) combinado com a formação de uma estrutura acicular nas regiões inferiores (R3 e R4), as amostras contendo os maiores teores de carbono (0,11% e 0,13% de C) acarretaram valores mais elevados de dureza na borda da bucha (figuras 97 e 102). A estrutura composta por grãos mais refinados e por perlita aleatoriamente dispersa (figura 79 – micrografia A1) proporcionou uma grande elevação nos valores da microdureza na região superior. Por sua vez, a região inferior apresentou estrutura acicular refinada que aumenta a resistência mecânica [99], com a presença de ferrita de Widmanstätten (figura 81).

Apesar dos maiores valores de microdureza obtidos na região deformada pelas amostras contendo os maiores teores de carbono (A2 e C4), as amostras com menor teor de carbono (B2 e B4) apresentaram os maiores aumentos relativos de microdureza. Estes aumentos podem chegar a 80% dependendo da amostra analisada, quando são comparados os valores de microdureza da região deformada com os valores de microdureza dos materiais-base. Isto demonstra que as estruturas refinadas formadas na borda da bucha em virtude da recristalização, mais do que somente a composição química das amostras, influenciam as propriedades mecânicas no sentido de aumentá-las [55].

Também em função da formação de estruturas refinadas na região deformada das buchas escoadas, as amostras com maior espessura, apesar de apresentarem valores menores de microdureza para o material-base, quando comparadas com as amostras contendo teores de carbono semelhantes (A2 e C4, B2 e B4), apresentaram maiores incrementos relativos, que dependendo da região atingiram variações de até 80%.

6.3.2 Resistência à tração

Segundo a tabela 17, os grupos de amostras A2 e B2 apresentaram valores equivalentes de resistência máxima à tração, mostrando que as variações na geometria das buchas (espessura de parede e comprimento da bucha) e as alterações microestruturais que produziram diferentes perfis de microdureza têm pouca influência.

Do mesmo modo, as amostras dos grupos B4 e C4 não apresentaram variações significativas nos valores de resistência máxima à tração, sendo

consideradas estatisticamente iguais, como mostrado na tabela 17. As estruturas aciculares apresentadas pelas amostras do grupo C4, mais favoráveis quanto à resistência mecânica, se concentraram mais nas regiões inferiores das buchas (R3 e R4) e possivelmente foram compensadas por uma geometria de bucha mais robusta obtida pelas amostras do grupo B4, conduzindo a valores de resistência semelhantes para esses grupos.

Os resultados dos cálculos de resistência realizados para verificar o comportamento teórico das buchas indicaram que as seções das chapas apresentam uma tensão de cisalhamento mais elevada que as seções das raízes dos filetes das roscas, quando sujeitas a cargas idênticas (anexo G). Deste modo, a falha da união aparafusada ocorreria pelo cisalhamento dos filetes da rosca.

Porém, nos ensaios de resistência à tração, as amostras com espessura de 2,65 mm romperam na seção da chapa junto à base da bucha, contrariando os resultados dos cálculos teóricos, como mostrado na figura 109. Em contrapartida, os resultados se mostraram corretos para as amostras com espessura de 4,75 mm, que romperam junto à raiz dos filetes da rosca.

Esse comportamento das amostras com menor espessura (grupos A2 e B2) é consequência das alterações produzidas na estrutura original dos materiais das chapas pelo processo de furação por escoamento e posteriormente pelo processo de rosqueamento, no sentido do aumento da dureza e da resistência mecânica. O processo de furação por escoamento promove grandes alterações na microestrutura dos materiais, refinando a região próxima à borda da bucha e encruando as regiões mais afastadas, enquanto o processo de rosqueamento por laminação produz mais encruamento no material durante a geração dos filetes das roscas, como mostram as figuras 103 a 105.

A elevação das propriedades mecânicas do material, em função do aumento da densidade de discordâncias (equação 7) e da diminuição do diâmetro médio de grão (equação 8), em conjunto com uma melhor distribuição da carga pela geometria da rosca, conduzem a que o rompimento não mais ocorra na raiz dos filetes, mas sim na seção da chapa junto à base da bucha.

Os resultados da simulação numérica novamente conduzem a essa situação. Com a aplicação da carga, surgem tensões elevadas junto à raiz dos filetes, mas também na região de contato entre o dispositivo de sujeição e a amostra (figura 117), que podem evoluir através da seção da chapa cisalhando o material.

Para as chapas com espessura de 4,75 mm, a simulação numérica também aponta para o cisalhamento dos filetes da rosca, como mostrado na figura 113.

As amostras dos grupos B4 e C4, assim como aconteceu para a resistência máxima à tração, também se igualaram na classificação quanto à capacidade de carga, atingindo a classe de resistência 8.

As amostras dos grupos A2 e B2 não obtiveram classificação quanto à sua capacidade de carga. Segundo a norma DIN 267 - parte 4, a menor classe de resistência para uma rosca M12 normal apresenta como carga o valor de 42,10 kN, que é superior a mais elevada carga máxima de resistência alcançada por essas amostras (tabela 17).

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

7.1 Conclusões

7.1.1 Relação entre o processo e suas características

A combinação das elevadas velocidades de avanço e baixas rotações resultou em aumentos significativos nos esforços e na potência mínima necessária para a conformação da bucha, como consequência das elevadas taxas de deformações e menores níveis de introdução de energia termomecânica promovidas por esses parâmetros de trabalho.

As maiores rotações e menores velocidades de avanço empregadas ($n = 5000 \text{ min}^{-1}$ e $v_f = 100 \text{ mm/min}$) geraram os níveis mais elevados de trabalho total de conformação, W_F , sendo que as chapas de maior espessura (4,75 mm) apresentaram valores até 84% maiores que as chapas de menor espessura (2,65 mm). Já a variação do teor de carbono não apresentou resultados conclusivos quanto a sua influência sobre o trabalho total de conformação.

As temperaturas máximas médias, T_{MAXmed} , mais elevadas foram geradas nas amostras nas quais foram empregadas as rotações mais elevadas em conjunto com as menores velocidades de avanço, como consequência dos maiores níveis de introdução de energia mecânica e dos maiores tempos de processo gerados por esses parâmetros de trabalho.

A divisão do gradiente de aquecimento em dois instantes durante o período de aquecimento, auxilia na melhor compreensão do comportamento da introdução de energia na região de trabalho, durante o progresso do processo de execução da bucha escoada. O gradiente de aquecimento médio $\Delta T1_{AQUEC.med}$, é relacionado ao período de processo que compreende o início da furação até a temperatura de referência de 650°C , e o gradiente de aquecimento $\Delta T2_{AQUEC.med}$ representa o comportamento da temperatura a partir da temperatura de referência (650°C) até a temperatura máxima atingida.

Os maiores valores para os gradientes de aquecimento e resfriamento foram obtidos em buchas escoadas confeccionadas com os parâmetros de trabalho mais severos ($n = 3000 \text{ min}^{-1}$ e $v_f = 300 \text{ mm/min}$). Os gradientes de aquecimento,

$\Delta T_{1\text{AQUEC.méd}}$ e $\Delta T_{2\text{AQUEC.méd}}$, apresentaram valores até 100% mais elevados, enquanto o gradiente de resfriamento, $\Delta T_{\text{RESF.méd}}$, atinge valores até 70% mais elevados que as demais amostras. Essas condições promovem uma concentração da energia em uma região mais estreita com relação à borda da bucha e, deste modo, esfria mais rapidamente.

Nas buchas escoadas conformadas com as menores rotações e maiores velocidades de avanço foram obtidos valores mais favoráveis com relação à geometria da bucha, com paredes mais espessas apesar de serem mais curtas.

O aumento da espessura da chapa resulta em aumento significativo nos esforços e na potência mínima necessária para a conformação da bucha, como consequência do maior volume de material a ser deformado e maior área de contato com a ferramenta.

Para a geometria de ferramenta empregada, o tempo de furação das chapas de maior espessura é menor quando comparado às chapas menos espessas, para parâmetros de trabalho idênticos. Essa condição é reflexo do menor comprimento de furação necessário para obtenção da bucha escoada, em virtude do maior volume de material que ascende para formar a rebarba superior.

Para todas as condições de deformação empregadas, nas amostras obtidas a partir das chapas de maior espessura foram atingidos valores de temperaturas extremamente elevados, ultrapassando a temperatura Ac3.

As maiores velocidades de aquecimento, $\Delta T_{1\text{AQUEC.méd}}$, foram atingidas em amostras de menor espessura, enquanto as maiores velocidades de aquecimento, $\Delta T_{2\text{AQUEC.méd}}$, em amostras mais espessas. A $\Delta T_{1\text{AQUEC.méd}}$ é influenciada pela distância entre a fonte de geração de calor (ferramenta) e o local de medição (termopar), e a $\Delta T_{2\text{AQUEC.méd}}$ é influenciada pela maior temperatura máxima alcançada e pelo menor tempo de processo.

Em função do maior volume de material conformado, as buchas escoadas em chapas de 4,75 mm de espessura resultaram com paredes até 40% mais espessas, sendo que o comprimento da bucha não apresentou diferenças significativas (10% maiores).

As chapas contendo maior teor de carbono em sua composição química (ABNT 1010) geraram forças de avanço mais elevadas, enquanto as chapas contendo menores teores de carbono (ABNT 1006) apresentaram valores mais

elevados de momento torçor e potência.

Os teores de carbono dos materiais empregados nas amostras parecem não apresentar influência sobre a temperatura, obtendo-se diferenças nos valores de temperatura máxima média em torno de 2% para as amostras dos grupos A2 (0,13%) e B2 (0,04% C), e de 10 % no máximo, para as amostras dos grupos B4 (0,04% C) e C4 (0,11% C).

O teor de carbono das amostras não apresenta influência sobre os gradientes, a julgar pelos valores obtidos e pelas variações apresentadas pelos grupos de amostras.

As amostras com menor teor de carbono (ABNT 1006) apresentaram tendência a buchas com maior espessura de parede, enquanto as amostras contendo maior teor de carbono (ABNT 1010), buchas mais longas.

7.1.2 Relação entre as características do processo e a microestrutura

A análise metalográfica das amostras revela que a ZTA da região de deformação é composta por duas faixas que apresentam alterações microestruturais distintas. A faixa A, junto à borda da bucha, é estreita e apresenta os maiores refinamentos e transformações microestruturais, e a faixa B, mais interna e mais larga, apresenta estruturas mais deformadas e menos refinadas.

Os maiores refinamentos sobre a faixa A ocorrem na região compreendida pela seção da chapa (entre a superfície superior e superfície inferior da chapa), e foram observados em amostras onde foram empregadas as maiores velocidades de avanço e menores rotações. Essa combinação de parâmetros de trabalho promove uma maior intensidade de deformação no material e temperaturas localmente menores (entre Ac_1 e Ac_3), que levaram à recristalização da estrutura e a um refino de grão bastante intenso.

Para parâmetros idênticos de trabalho, a microestrutura das amostras contendo maior teor de carbono (grupos A2 e C4) apresentou os maiores refinamentos, como consequência da maior taxa de nucleação da recristalização proporcionada pela maior quantidade de carbono presente na estrutura.

A formação de estruturas aciculares se concentrou nas regiões inferiores das buchas, como resultado das altas temperaturas (acima de Ac_1) e das velocidades de resfriamento elevadas.

A região inferior das buchas escoadas nas amostras contendo maior teor de carbono e conformadas com as maiores rotações e menores velocidades de avanço apresentam a formação de ferrita de Widmanstätten, que é estimulada por resfriamentos acelerados a partir da região de transformação. Na região superior da bucha a perlita aparece uniformemente distribuída na estrutura, como consequência de aquecimentos elevados, por tempo suficiente para ocorrer austenitização e dissolução do carbono.

Na faixa B da ZTA das amostras, podem ser identificadas estruturas altamente deformadas, onde as temperaturas não devem ter ultrapassado Ac1. Em regiões próximas da faixa A, aparecem estruturas mistas compostas por grãos deformados e por grãos refinados, indicando que a estrutura sofreu recristalização parcial.

Em regiões próximas ao material-base, os materiais de maior espessura, conformados com parâmetros de trabalho mais severos ($n = 3000 \text{ min}^{-1}$ e $v_f = 300 \text{ mm/min}$) apresentam grãos alongados alinhados com a direção de deformação, onde não se percebe a ocorrência de recristalização.

7.1.3 Relação entre a microestrutura e as propriedades mecânicas

Os resultados da medição da microdureza mostram uma camada mais endurecida ao longo da borda da bucha escoada, evidenciando as alterações microestruturais sobre a ZTA.

Os maiores aumentos da microdureza foram verificados nas amostras confeccionadas com maiores velocidades de avanço e menores rotações, que por sua vez promoveram os maiores refinamentos da estrutura junto à borda da bucha.

As amostras com os maiores teores de carbono (grupos A2 e C4) apresentaram os maiores valores de microdureza para a região deformada. Já as com os menores teores de carbono (grupos B2 e B4) apresentaram os maiores aumentos relativos de microdureza, de até 80%.

As amostras obtidas a partir de materiais com maior espessura (4,75 mm) apresentaram os maiores incrementos relativos na microdureza, podendo chegar até a 80% maiores que a microdureza do metal-base, como consequência dos intensos refinamentos ocasionados na microestrutura.

Os ensaios de resistência à tração não apresentaram resultados que

permitam relacionar a capacidade de carga máxima das amostras com as características do processo e com as alterações microestruturais, apesar de apresentarem geometria de bucha e microestruturas diferentes.

As estruturas aciculares, com presença de ferrita de Widmanstätten, ocorrem principalmente nas regiões inferiores da bucha, onde não devem apresentar grande influência sobre a resistência da bucha roscada.

O processo de rosqueamento produz um aumento do encruamento na região termomecanicamente afetada. Nas amostras obtidas de chapas menos espessas, dependendo da região da bucha, a altura do filete da rosca ultrapassa a largura da ZTA total gerada nas amostras.

Em função da pequena capacidade de carga, as amostras dos grupos A2 e B2 não atingem sequer a classe de resistência 5, que é a menor classe possível para uma rosca M12 normal, demonstrando que a relação entre o diâmetro da ferramenta e a espessura de chapa não é otimizada.

Com o aumento da espessura a capacidade de carga das amostras aumentou significativamente, sendo que as amostras dos grupos B4 e C4 alcançaram classe de resistência 8 para as buchas roscadas.

O dimensionamento teórico da resistência das roscas apresenta dificuldades para a previsão do real comportamento da bucha roscada quando sujeita a uma carga. No cálculo são empregados os dados de resistência referentes aos materiais-base, não sendo consideradas a geometria da bucha e as alterações microestruturais que ocorrem durante o processo de furação por escoamento.

A simulação numérica, empregando o método dos elementos finitos, mostrou-se uma ferramenta bastante válida na previsão do comportamento das buchas roscadas. Com a aplicação de softwares específicos para a área de conformação, os resultados poderão ser ainda mais significativos.

O método da inferência estatística (ANOVA) constituiu-se uma ferramenta importante na determinação das diferenças existentes entre as microestruturas das regiões analisadas sobre uma mesma amostra, assim como entre amostras diferentes.

7.2 Sugestões de Continuidade

O método de medição da temperatura através do emprego de termopares

soldados ao corpo de prova deve ser aprimorado, tendo em vista a dificuldade da sua realização em função da dinâmica do processo. O acréscimo de mais pontos de leitura, com termopares colocados em furos dispostos em raios e profundidades diferentes ao longo da rebarba inferior, possivelmente resultariam numa melhor caracterização do processo, com resultados mais significativos.

A conjugação dos efeitos produzidos pelos processos de furação por escoamento e rosqueamento por conformação sobre a microestrutura das buchas merece ser estudado. A determinação da influência da variação dos parâmetros empregados no processo de rosqueamento por conformação merece destaque.

Um maior domínio do processo de furação por escoamento, nos campos mecânico e metalúrgico, possibilitará que sejam realizadas simulações numéricas com resultados mais significativos quanto à previsão do comportamento do material sujeito ao processo.

A determinação quantitativa da microestrutura formada em termos do diâmetro dos grãos ferríticos, distribuição e fração volumétrica das fases, densidade de discordâncias, espaçamento interlamelar da perlita e tamanho e distribuição de precipitados, é de grande relevância, pois podem afetar a resistência mecânica e a tenacidade dos aços.

Os fenômenos metalúrgicos de endurecimento e de “amolecimento” dos aços devem ser melhor estudados. Ensaio de deformação a quente podem auxiliar no estudo dos fenômenos de recuperação e recristalização e, também, na determinação das taxas de deformações envolvidas no processo.

Como alvo de próximos trabalhos sugere-se os aços IF e os aços ARBL. Devido ao seu alto grau de conformabilidade os aços livres de intersticiais (IF) laminados a frio tem sido amplamente utilizados na indústria automobilística na obtenção de formas complexas e de alta qualidade dimensional. Os aços microligados conhecidos como aços de alta resistência e baixa liga (ARBL ou HSLA), são materiais empregados em inúmeras aplicações onde se requerem elevada resistência mecânica, boa tenacidade e facilidade de soldagem.

A determinação de parâmetros de trabalho (rotação e velocidade de avanço) que possibilitem a obtenção de ZTA com largura maximizada e composta por microestrutura que favoreça o aumento da capacidade de carga das buchas escoadas merece atenção.

O emprego do processo de furação por escoamento em máquinas-

ferramentas HSC poderá abrir um novo leque de aplicações, pois podem possibilitar a introdução de elevados níveis de energia através do emprego de rotações extremamente elevadas, além da possibilidade de se trabalhar com materiais de maior resistência.

8 REFERÊNCIAS

- [1] DUARTE FILHO, O. C. **Estudo Microestrutural e de Capacidade de Carga na Furação por Escoamento com Condições de Trabalho Variáveis em Processo**. Florianópolis: UFSC, 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), CPGEM/Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.
- [2] LOPES, J. C. O. **Furação por Escoamento e Rosqueamento por Conformação**. Florianópolis: UFSC, 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), CPGEM/ Universidade Federal de Santa Catarina, 1994.
- [3] ZECHA CARBIDE TOOL MANUFACTURERS. **Centerdrill – flow punch forming process**. Alemanha. CATÁLOGO.
- [4] MONTEIRO, W. A. O papel da microestrutura nos processos de conformação mecânica a quente e a frio. In: Seminário Nacional de Forjamento, XVII, 1997, Porto Alegre. **Anais**. Porto Alegre: Schaeffer, L., 1997. p. 49 - 57.
- [5] BATISTA, E. M.; SCHAEFFER, L. Evolução microestrutural do aço 16MnCr5 em trabalho a morno e a quente. In: Seminário Nacional de Forjamento, XVII, 1997, Porto Alegre. **Anais**. Porto Alegre: Schaeffer, L., 1997. p. 221 - 231.
- [6] LOPES, J. C. O. **Beitrag zur Theorie des Thermofliesslochformens**. Kassel: UGK - IPL, 1999. Tese (Doutorado), Institut für Produktionstechnik und Logistik, Universität Gesamthochschule Kassel, 1999.
- [7] WEINGAERTNER, W. L.; LOPES, J. C. O. et al. Furação de chapas por escoamento: uma nova tecnologia de fabricação. **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 368, p. 85 – 97, set. 1996.
- [8] KRETSCHMER, G. Schmiermittel machts möglich. **Maschinenmarkt**, v. 93, n. 18, p. 80 – 83, 1987.

- [9] WEINGAERTNER, W. L.; TIKAL, F.; LOPES, J. C. O. et al. Flowdrilling: bushes formed in thin plates. In: International Manufacturing Engineering Conference, 1996, Connecticut, USA. **Anais**. Connecticut: ASME, 1996. p. 227 - 231.
- [10] WEINGAERTNER, W. L.; LOPES, J. C. O. Fließlochformen und Gewindefurchen – Erfahrungen auf konventionellen Werkzeugmaschinen. In: Seminar - Fließlochformen und Gewinde: Berichte aus Wissenschaft und Praxis, I, 1995, Kassel, Alemanha. **Anais**. Kassel: IPL, 1995. Não paginado.
- [11] LOPES, J. C. O. **Furação por Escoamento**. 1995, 75 p. Qualificação de Doutorado - CPGEM/ Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [12] WEINGAERTNER, W. L.; LOPES, J. C. O. et al. Furação por fluência: aspectos da recuperabilidade do processo. **Revista TecnoMetal**, Portugal, n. 110, p. 5 – 9, maio/jun.1997.
- [13] FLOWDRILL. **Flowdrill® Friction Drilling: A Process For The New Millennia**. Disponível em: <<http://www.flowdrill.com>> Acesso em: 12 fev. 2001.
- [14] BRITISH STEEL Tubes & Pipes. **SHS Jointing – Flowdrill & Hollo-Bolt**. Inglaterra. CATÁLOGO.
- [15] FRANCE, J. E.; DAVIDSON, J. B.; KIRBY, P. A. Use of flowdrilled connections in multi-storey frames with tubular columns. In: Nordic Steel Construction Conference, 1995. **Proceedings**. Não paginado.
- [16] FRANCE, J. E.; DAVIDSON, J. B.; KIRBY, P. A. Experimental testing of flowdrill connectors with concrete-filled SHS columns. In: Tubular Structures, VII, 1996, Miskolc, Hungria. **Proceedings**. Rotterdam: Balkema, 1996. p. 333-340.
- [17] FRANCE, J. E.; DAVIDSON, J. B.; KIRBY, P. A. Testing of simple flowdrill connections. **IABSE**, Turkey, 1996. Não paginado.

- [18] TÖLLE, K. Thermofliessbohren und Gewindeformen. In: Seminar - Fließlochformen und Gewinde: Berichte aus Wissenschaft und Praxis, I, 1995, Kassel, Alemanha. **Anais**. Kassel: IPL, 1995. Não paginado.
- [19] GROTMANN, D. Bemessung von Anschlüssen im Bauwesen. In: Seminar - Fließlochformen und Gewinde: Berichte aus Wissenschaft und Praxis, I, 1995, Kassel, Alemanha. **Anais**. Kassel: IPL, 1995. Não paginado.
- [20] THILWIND, J. H. The flowdrill-system in structural hollow section. In: Seminar - Fließlochformen und Gewinde: Berichte aus Wissenschaft und Praxis, I, 1995, Kassel, Alemanha. **Anais**. Kassel: IPL, 1995. Não paginado.
- [21] ECKHARDT, M. **Aspectos microestruturais da conformação a morno em aços de baixo carbono**. Florianópolis: UFSC, 1997. Monografia, CPGEM, Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.
- [22] Heiler, R. **Fliesslochformen und Gewindefurchen auf NC-gesteuerten Werkzeugmaschinen**. Kassel: UghK - IPL, 1999. Tese (Doutorado), Institut für Produktionstechnik und Logistik, Universität Gesamthochschule Kassel, 1999.
- [23] STREPPEL, A. H.; KALS, H. J. J. Flowdrilling: a preliminary analysis of a new bush-making operation. **Annals of the CIRP**. v. 32, n. 1, 1983, p. 167-171.
- [24] HEILER, R. Fließlochformen und Gewindefurchen auf CNC-Werkzeugmaschinen. In: Seminar - Fließlochformen und Gewinde: Berichte aus Wissenschaft und Praxis, I, 1995, Kassel, Alemanha. **Anais**. Kassel: IPL, 1995. Não paginado.
- [25] WEINGAERTNER, W. L.; TIKAL, F.; LOPES, J. C. O. et al. Flowdrill system: high resistance threads in thin metal sheets. **The International Journal for Manufacturing Science & Production**, v. 1, n. 1, p. 41 – 50, 1997.

- [26] TIKAL, F.; HEILER, R.; MÜLLER-KRAUS, F. U. Fließlochformen und Gewindefurchen in austenitischen Edelstählen. **Maschinenmarkt**, v. 102, n. 47, p. 28 – 33, 1996.
- [27] SATO, K.; TERADA, S. Bush forming at aluminum heat with flowdrill operations and its strength. Comparison with others metal sheets. Light Materials for Transport Systems. **International Symposium**, Kyongju-Korea, 1993, p. 921-936.
- [28] CRAWFORD, R. J.; KEATING, T. G.; CHEE, W. Y.; TAN, Y. L. Flow drilling of plastics. **Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications**, v. 16, n. 4, p. 263-270, 1991.
- [29] WEINGAERTNER, W. L.; LOPES, J. C. O. Flowdrilling and flowtapping – high resistance threads formed in thin metal sheets. In: International Conference on Production Research, XIV, 1997, Osaka, Japan. **Proceedings**. Osaka: Osaka Institute of Technology, Japan, 1997. p. 394 - 397.
- [30] WEINGAERTNER, W. L.; LOPES, J. C. O.; DUARTE FILHO, O. C. et al. Aspectos tecnológicos do desenvolvimento da furação por escoamento – uma tecnologia near net shape aplicada a produção de uniões resistentes. In: XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1997. **Anais**. Bauru: 1997. Não paginado.
- [31] KERKHOFS, M.; STAPPEN, M.; D'OLIESLAEGER, M. et al. **The performance of (Ti,Al)N – coated flowdrills**. Elsevier Science S.A. Surface and Coatings Technology, 68/69, 1994, p. 741 - 746.
- [32] DA SILVA, D. C. **Ferramentas Cerâmicas na Furação por Escoamento**. 1996. Projeto de Dissertação de Mestrado – CPGEM, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

- [33] T.K.M. Sprüh- und Dosiergeräte GmbH. **PSD 100 Minimalschmiersystem für den Einsatz pastöser Medien**. Alemanha. CATÁLOGO.
- [34] MÜLLER-KRAUS, F. U. **Kenngrossenanalyse für das Fliesslochformen und Gewindeformen in Stahlblech ST37-mittel auf CNC-Maschinen**. Kassel, Alemanha: Universität Gh Kassel, 1994. Diplomarbeit, Institut für Produktionstechnik und Logistik, Universität Gesamthochschule Kassel, 1994.
- [35] Weingaertner, W. L.; Oliveira C. A. S.; Eckhardt, M. Evolução da cinemática da furação por escoamento. In: XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1999, Águas de Lindóia. **Anais**. Águas de Lindóia: 1999. Não paginado.
- [36] KRETSCHMER, G. **Fliesslochformen von Blechdurchzügen**. Siegen, Alemanha: Universität Gh Siegen, 1980. Tese (Doutorado), Universität Gesamthochschule Siegen, 1980.
- [37] KRETSCHMER, G. Fliesslochformen - Das Verfahren. In: Seminar - Fliesslochformen und Gewinde: Berichte aus Wissenschaft und Praxis, I, 1995, Kassel, Alemanha. **Anais**. Kassel: IPL, 1995. Não paginado.
- [38] BAUER, D.; KRETSCHMER, G. Umformarbeit beim Fliesslochformen. **Wt – Zeitschrift für Industrielle Fertigung**, v. 72, p. 451 – 454, 1982.
- [39] BRITISH STEEL, Tubes & Pipes. **Flowdrill jointing system for hollow section connections**. Technical development report, Corby, England, July 1994, não paginado.
- [40] SCHOMBERG, J.; KLEIN, U. **Einfluss der Polygoneometrie des Fliesslochformers auf den Fertigungsprozess**. Kassel, Alemanha: Universität Gh Kassel, 1996. Studienarbeit, Institut für Produktionstechnik und Logistik, Universität Gesamthochschule Kassel, 1996.

- [41] WEINGAERTNER, W. L.; GIRAUDI, J. B. et al. Taladrado por fluencia en condiciones extremas com ensayo metalografico adjunto. In: Congreso Nacional de Ingenieria Mecanica, VII, 1996, Valdivia, Chile. **Anais**. Valdivia: Universidad Austral, 1996. p. 445 - 448.
- [42] WEINGAERTNER, W. L.; LOPES, J. C. O. et al. Fabricação de roscas internas em buchas escoadas. In: Seminário Nacional de Forjamento, XVI, 1996, Porto Alegre. **Anais**. Porto Alegre: Schaeffer, L., 1996. p. 51 - 58.
- [43] WEINGAERTNER, W. L.; TIKAL, F. et al. Rosqueamento por conformação: uma alternativa economicamente viável para muitas aplicações. **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 372, p. 103 – 114, jan. 1997.
- [44] WEINGAERTNER, W. L.; LOPES, J. C. O. et al. Uma comparação entre o rosqueamento convencional e o rosqueamento por conformação. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1995, Belo Horizonte. **Anais**. Belo Horizonte: 1995. Não paginado.
- [45] WEINGAERTNER, W. L.; LOPES, J. C. O. et al. **Rosqueamento por conformação: uma alternativa econômica para muitas aplicações**. Florianópolis: UFSC/EMC/LMP, 1997. Relatório. 14 p.
- [46] WEINGAERTNER, W. L.; LOPES, J. C. O. et al. Aspectos do processo de rosqueamento por conformação. In: Congreso Nacional de Ingenieria Mecanica, VII, 1996, Valdivia, Chile. **Anais**. Valdivia: Universidad Austral, 1996. p. 441 - 444.
- [47] HESS, H. J. **Grundlagenuntersuchungen zum Formen von Innengewinden in unterschiedlichen Materialien**. Aachen, Alemanha: RWTH Aachen, 1992. 104 p. Studienarbeit, Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 1992.

- [48] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 267 – Teil 4: Mechanische Verbindungselemente, technische Lieferbedingungen, Festigkeitsklassen für Muttern.** Deutschland: Aug. 1983.
- [49] BRESCIANI FILHO, E.; ZAVAGLIA, C. A. C.; BUTTON, S. T. et al. **Conformação plástica dos metais.** 4. ed. rev. amp. Campinas: Ed. da UNICAMP, 1991. 385 p.
- [50] CHIAVERINI, V. **Tratamento térmico das ligas ferrosas.** São Paulo: Associação Brasileira de Metais – ABM, 1985. 213 p.
- [51] PADILHA, A. F.; SICILIANO JR., F. **Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura.** 2. ed. rev. e amp. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Metais, 1996. 158 p.
- [52] REED-HILL, R. E. **Princípios de Metalurgia Física.** 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982. 776 p.
- [53] HONEYCOMBE, R. W. K. **The plastic deformation of metals.** London: Edward Arnold, 1971. 477 p.
- [54] CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2002. 589 p.
- [55] DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica.** 2. ed. trad. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1981. 653 p.
- [56] MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. **Princípios de metalurgia mecânica.** São Paulo: Edgard Blücher, 1982. 505 p.
- [57] HERTZBERG, R. W. **Deformation and fracture mechanics of engineering materials.** 3. ed. Singapura: John Wiley & Sons, 1989. 680 p.

- [58] GONÇALVES, M. Processamento termomecânico e evolução microestrutural de ligas de alumínio: aspectos da metalurgia física fundamental. In: Workshop sobre Textura e Relações de Orientação: Deformação Plástica, Recristalização, Crescimento de Grão, Transformações de Fases, 2001, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Tschiptschin, André Paulo; et al., EPUSP, 2001. p. 221 – 236.
- [59] GUY, A. G. **Physical metallurgy for engineers**. London: Addison-Wesley Publishing Company, 1962. 374 p.
- [60] FERREIRA FILHO, A.; DE LIMA, L. M. G.; PADILHA, A. F.; DE LIMA, N. B. Controle da microestrutura e da textura de chapas de aço baixo carbono para estampagem. In: Workshop sobre Textura e Relações de Orientação: Deformação Plástica, Recristalização, Crescimento de Grão, Transformações de Fases, 2001, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Tschiptschin, André Paulo; et al., EPUSP, 2001.p. 189 – 203.
- [61] HAASEN, P. **Physical metallurgy**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 392 p.
- [62] DE LIMA, N. B.; DE LIMA, L. M. G.; PADILHA, A. F. Texturas de recristalização In: Workshop sobre Textura e Relações de Orientação: Deformação Plástica, Recristalização, Crescimento de Grão, Transformações de Fases, 2001, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Tschiptschin, André Paulo; et al., EPUSP, 2001. p. 59 – 75.
- [63] DOHERTY, R. D.; HUGHES, D. A.; HUMPHREYS, F. J.; et al. Current issues in recrystallization: a review. **Materials Science and Engineering**, A238, p. 219 – 274, 1997.
- [64] PADILHA, A. F.; SICILIANO JR., F. Crescimento das regiões recristalizadas. In: Workshop sobre Textura e Relações de Orientação: Deformação Plástica, Recristalização, Crescimento de Grão, Transformações de Fases, 2001, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Tschiptschin, André Paulo; et al., EPUSP, 2001. p. 49 - 58.

- [65] BATISTA, E. M.; SCHAEFFER, L. Evolução microestrutural do aço DIN 16MnCr5 conformado em diferentes temperaturas. In: Seminário Nacional de Forjamento, XVIII, 1998, Porto Alegre. **Anais**. Porto Alegre: Schaeffer, L., 1998. p. 25 - 32
- [66] SICILIANO JR., F. Recuperação e recristalização durante a deformação a quente. In: Workshop sobre Textura e Relações de Orientação: Deformação Plástica, Recristalização, Crescimento de Grão, Transformações de Fases, 2001, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Tschiptschin, André Paulo; et al., EPUSP, 2001. p. 93 - 108.
- [67] SCHMITT, J. H.; FABREGUE, P.; THOMAS, B.J. Recristallisation Dynamique dans les aciers. **Journal de Physique IV**, Colloque C3, v. 5, p. C3-153 - C3-163, abr. 1995.
- [68] BARBOSA, R. Simulação de processos industriais a partir do ensaio de torção a quente. In: Workshop sobre Textura e Relações de Orientação: Deformação Plástica, Recristalização, Crescimento de Grão, Transformações de Fases, 2001, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Tschiptschin, André Paulo; et al., EPUSP, 2001. p. 121 – 129.
- [69] SAKAI, T.; JONAS, J. J. Dynamic recrystallization: mechanical and microstructural considerations. **Acta metallurgica**, v. 32, n. 2, p. 189 – 209, 1984.
- [70] RAJ, R. Development of a processing map for use in warm-forming and hot-forming processes. **Metallurgical Transaction A**, v. 12A, , p. 1089 – 1097, jun. 1981
- [71] JONAS, J. J. Dynamic recrystallization – cientific curiosity or industrial tool? **Materials Science and Engineering**, A184, p. 155 – 165, 1994.
- [72] NAJAFI-ZADEH, A.; JONAS, J. J.; YUE, S. Grain refinement by dynamic recrystallization during the simulated warm-rolling of interstitial free steels. **Metallurgical Transaction A**, v. 23A, p. 2607 – 2617, set. 1992.

- [73] BIGLOU, J.; LENARD, J. G. A study of dynamic recrystallization during hot rolling of microalloyed steels. **Annals of the CIRP**, v. 45/1/1996, p. 227 – 230.
- [74] PICKERING, F. B. **Physical metallurgy and the design of steels**. Londres: Applied Science Publishers, 1978.
- [75] HONEYCOMBE, R. W. K. **Aços – microestrutura e propriedades**. Traduzido por M. Amaral Fortes e A. Cabral Ferro. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1982. 348 p.
- [76] MARDER, A. R. Structure-property relationship in ferrous transformation products. In: Phase transformations in ferrous alloys. 1984, Warrendale. **Anais**. Warrendale: A. R. Marder e J. I. Goldsteis, TMS-AIME, 1984. p. 11 - 41.
- [77] HERNÁNDEZ, C. A.; MEDINA, S. F.; et al. Fundamentos metalúrgicos de los aceros microaleados. **Rev. Metal.**, Madrid, p. 369 – 382, 28 (6) 1992.
- [78] PICKERING, F. B. The optimization of microstructures in steel and their relationship to mechanical properties. In: Symposium of Hardenability concepts with applications to steels. **Proceedings**. Chicago: D.V. Doane; J. S. Kirkaldy, TMS-AIME, 1977. p. 179 - 225.
- [79] TOWNSEND, R. D.; KIRKALDY, J. S. Widmanstätten ferrite formation in Fe-C alloys. **Transaction of the ASM**, v. 61, p. 605 – 619, 1968.
- [80] OHMORI, Y.; OHTSUBO, H.; et al. Morphology of bainite and widmanstätten ferrite. **Metallurgical and Materials Transaction A**, v. 25A, p. 1981 – 1989, set. 1994.
- [81] OLIVEIRA, C. A. S. **Têmpera direta de aços baixa liga: aspectos cinéticos, microestruturais e de propriedades mecânicas**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1994. 245 p. Tese (Doutorado), COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1994.

- [82] KRAUSS, G. In: Symposium of Hardenability concepts with applications to steels. **Proceedings**. Chicago: D.V. Doane; J. S. Kirkaldy, TMS-AIME, 1977. p. 229 - 245.
- [83] JOSEFSSON, B.; ANDRÉN, H. O. Microstructure of granular bainite. **Journal de Physique**, colloque C6, v. 49, p. C6-293 - C6-298, nov. 1988.
- [84] CHRISTIAN, J. W.; EDMONDS, D. V. The bainite transformation. In: International Conference: Phase Transformations in Ferrous Alloys, 1983, Philadelphia. **Proceedings**. Philadelphia: Marder, A. R.; Goldstein, L. I., 1983. p. 294 – 325.
- [85] JOARDER, A.; SARMA, D. S. Bainite morphologies in a 0.2 C – 1.5 Mn Steel. **Steel Research**, 63, (1), p. 33 a 38, jan. 1992.
- [86] REBELLO, J. M. A.; SAUER, A. **O constituinte austenita-martensita (AM)**. Disponível em: <<http://www.coppe.Ufrj.br/~notimat/materia/Vol1N1/artigo1/pagina2.html>> Acesso em: 20 jan. 2003.
- [87] BHADESHIA, H. K. D. H. **A reação bainítica em aços**. Traduzido por Carlos Nelson Elias. Disponível em: < <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/port/bainitepa.html>> Acesso em: 20 jan. 2003.
- [88] KLUEH, R. L.; ALEXANDER, D. J.; MAZIASZ, P. J. Bainitic Chromium-Tungsten Steels with 3 Pct Chromium. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 28A, n. 2, fev. 1997.
- [89] SPANOS, G. The fine structure and formation mechanism of lower bainite. **Metallurgical and Materials Transaction A**, v. 25A, p. 1967 – 1980, set. 1994.
- [90] BHADESHIA, H. K. D. H. **La Transformación bainítica en aceros**. Tradução de Francisca García Caballero. Disponível em: <<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/spanish/bainiaes.html>> Acesso em: 20/08/2000.

- [91] OHMORI, Y.; OHTSUBO, H.; et al. Growth of bainite and widmanstätten ferrite. **Materials Transactions, JIM**, v. 34, n. 3, p 216 – 223, 1993.
- [92] DRABUS B.V. **The flowdrill inventor**. Bélgica: 1987. CATÁLOGO.
- [93] MEDIA CYBERNETICS. **Image-Pro Plus**. Version 3.0 for Windows. Reference Guide.
- [94] MEDIA CYBERNETICS. **Materials-Pro Analyser**. Version 3.0 for Windows. User Guide.
- [95] MITUTOYO. Instruction Manual for Micro Hardness Testes Model: MVK – E3 (Double Optical System).
- [96] MITUTOYO. Table for Vickers Hardness Number for MVK – E3.
- [97] PANAMBRA INDUSTRIAL E TÉCNICA S.A. Manual de Operação e Manutenção – TUZM.
- [98] BRASIL, H. V. **Máquinas de levantamento**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1985. p 226.
- [99] SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R. **Mechanical engineering design**. 5. ed. New York: McGraw Hill, 1989.
- [100] HELMAN, H.; CETLIN, P. R. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2 ed. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1993. 170 p.
- [101] HANZAKI, A.Z.; PANDI, R.; HODGSON, P. D.; YUE, S. Continuous cooling deformation testing os steels. **Metallurgical Transactions A**, v. 24A, p. 2657 – 2665, dez.1993.

- [102] JONES, S. J.; BHADSHIA, H. K. D. H. Kinetics of the simultaneous decomposition of austenite into several transformation products. **Acta materialia**, v. 45, n. 7, p. 2911 – 2920, 1997.
- [103] BODNAR, R. L.; HANSEN, S. S. Effects of austenite grain size and cooling rate on Widmanstätten ferrite formation in low-alloy steels. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 25A, p. 665 – 675, abr. 1994.
- [104] YANG, J. R.; CHANG, L. C. The effect of stress on the Widmanstätten ferrite transformation. **Materials Science and Engineering**, A223, p. 158 – 167, 1997.
- [105] SHIPWAY, P. H.; BHADSHIA, H. K. D. H. The mechanical stabilization of Widmanstätten ferrite. **Materials Science and Engineering**, A223, p. 179 – 185, 1997.
- [106] HICKSON, M. R.; GIBBS, R. K.; HODGSON, P. D. The effect of chemistry on the formation of ultrafine ferrite in steels. **ISIJ International**, v. 39, n. 11, p. 1176 – 1180, 1999.
- [107] SINGH, A. P.; PRASAD, A.; PRAKASH, K., et al. Influence of thermomechanical processing and accelerated cooling on microstructure and mechanical properties of plain carbon and microalloyed steels. **Materials Science and Technology**, v. 15, p. 121 – 126, fev. 1999.
- [108] SAMUELS, L. E. **Light microscopy of carbon steels**. ASM International. Metal Park Ohio. Printed in USA. 1999.
- [109] PORTER, D. A.; EASTERLING, K. E. **Phase transformation in metals and alloys**. England: Van Nostrand Reinhold, 1981.

- [110] BUTTON, S. T. **Apostila da disciplina de Metodologia para Planejamento Experimental e Análise de Resultados**. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/pos-graduacao/IM317/im317.html>> Acesso em: 12 jun. 2003.
- [111] VIEIRA, S. **Estatística experimental**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 1999. 185 p.
- [112] FREUND, J. E.; SIMON, G. A. **Estatística aplicada**. 9 ed. trad. Porto Alegre: Bookman, 2000. 404 p.

ANEXOS

A - Dispositivo de Fixação dos Corpos de Prova

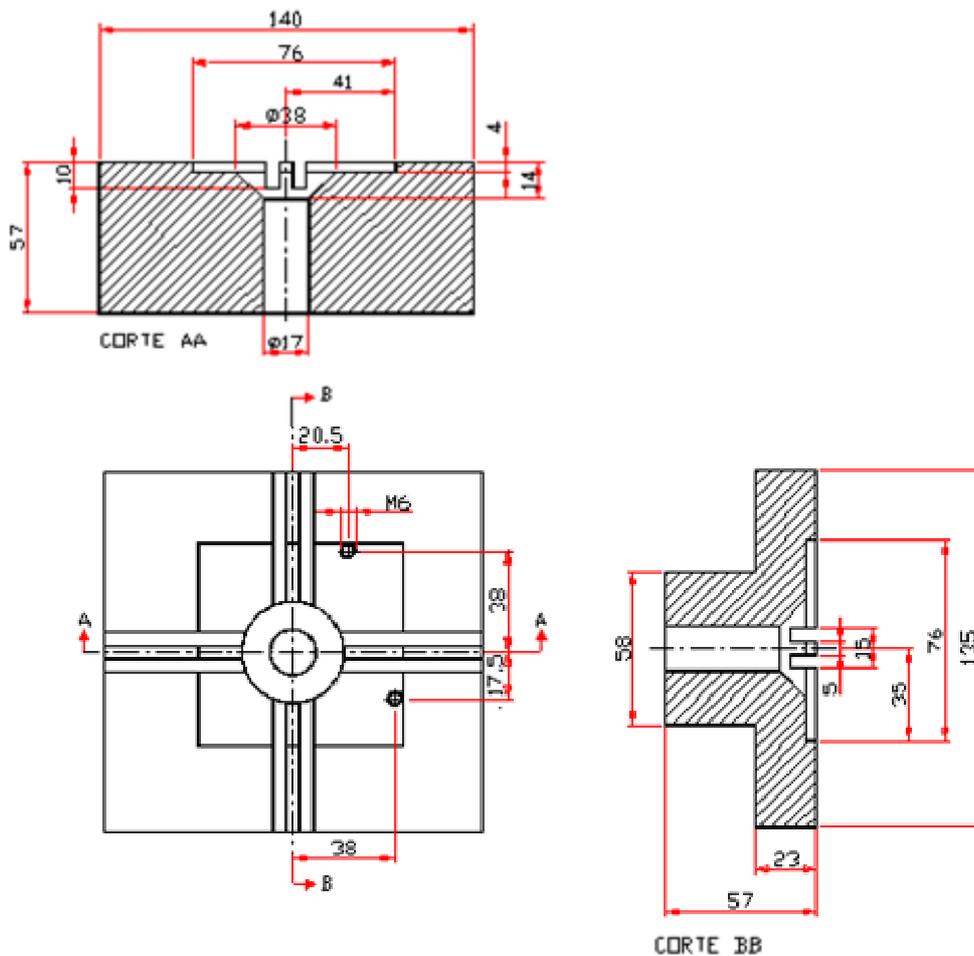


Figura 119 – Dispositivo de fixação dos corpos de prova (material: madeira).

B - Máquina-Ferramenta

Fresadora Romi F400 CNC (figura 120)

Comando: Sinumeric 7M

Potência Motora Máxima: 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: X 20 μm Y 30 μm Z 10 μm



Figura 120 – Máquina-ferramenta Romi Polaris F400.

C - Sistema de Aquisição de Sinais de Esforços

C1 - Dinamômetro piezelétrico

Fabricante:	Kistler Instrumente 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

C2 - Amplificadores de sinais

Fabricante:	Kistler Instrumente A.G.
Modelo:	5011
Faixa de Indicação:	$\pm 10 \dots 999.000$ pC
Linearidade:	$\leq 0,05\%$ VFE

Incerteza de Medição:	$\leq 99,9 \text{ pC}$	$\leq \pm 3\%$
	$\geq 100 \text{ pC}$	$\leq \pm 1\%$
Temperatura de Utilização:	0...50°C	

D - Sistema de Aquisição de Sinais de Temperatura

D1 - Multímetro digital

Fabricante: Hewlett-Packard

Modelo: HP 34401A

Resolução: até 6 ½ dígitos

Comunicação: HP-IB (IEEE-488) e RS-232

Memória: até 512 leituras

D2 - Programa de aquisição

Fabricante: Hewlett-Packard

Modelo: HP 34812A BenchLink/Meter

Comunicação: HP-IB (IEEE-488) e RS-232

E - Sistema de Aquisição e Tratamento de Imagens

E1 - Microscópio óptico com platina invertida

Fabricante: Olympus

Modelo: PMG3

Ampliações: 50X, 100X, 200X, 500X e 1000X.

E2 - Image-Pro Plus

Programa de captura e análise de imagens Image-Pro Plus, versão 3.0, da empresa MEDIA CYBERNETICS.

E3 - Micrômetro ocular digital

Fabricante: Olympus

Modelo: OFM-D4

Resolução: 0,001 mm

Pode ser empregado em toda gama de ampliações do microscópio.

F - Máquina Universal de Ensaios

Fabricante: Panambra Industrial S.A.

Modelo: 60 TUZ 760

Capacidade: 60 t

Máquina universal de ensaios destrutivos microprocessada que permite realizar testes de tração, compressão, flexão e cisalhamento (figura 121). O sistema de acionamento é hidráulico, acionado por bomba de pistão e o curso máximo de deslocamento é de 200 mm. Possui saída de sinal no padrão RS 232 para microcomputador.



Figura 121 – Máquina Universal de Ensaios.

G - Cálculo da Resistência da Rosca

Na determinação da tensão de cisalhamento empregaram-se como carga nos filetes as forças aplicadas no teste de classificação das roscas, 42,10 kN e 67,00 kN, para as espessura de chapas de 2,65 e 4,75 mm, respectivamente.

G1 - Tensão de cisalhamento na raiz dos filetes

a) Chapas com espessura de 2,65 mm

Considerando $Q = 42,10$ kN; $n = 3$ filetes; $r_r = 6,04$ mm; $b_r = 1,55$ mm, tem-se:

$$\tau = 42.100 / (2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot 6,04 \cdot 1,55)$$

$$\tau = 238,5 \text{ MPa}$$

b) Chapas com espessura de 4,75 mm

Considerando $Q = 67,00$ kN; $n = 4$ filetes; $r_r = 6,09$ mm; $b_r = 1,55$ mm, tem-se:

$$\tau = 67.000 / (2 \cdot \pi \cdot 4 \cdot 6,09 \cdot 1,55)$$

$$\tau = 282,41 \text{ MPa}$$

G2 - Tensão de cisalhamento na seção da chapa

a) Chapas com espessura de 2,65 mm

Considerando $Q = 42,10$ kN; $r_s = 6,72$ mm; $s = 2,65$ mm, tem-se:

$$\tau = 42.100 / (2 \cdot \pi \cdot 6,72 \cdot 2,65)$$

$$\tau = 376,26 \text{ MPa}$$

b) Chapas com espessura de 4,75 mm

Considerando $Q = 67,00$ kN; $r_s = 7,22$ mm; $s = 4,75$ mm, tem-se:

$$\tau = 67.000 / (2 \cdot \pi \cdot 7,22 \cdot 4,75)$$

$$\tau = 310,93 \text{ MPa}$$

H - Análise Estatística do Diâmetro e do Fator de Forma dos Grãos

Para análise dos dados amostrais de diâmetro médio e fator de forma médio apresentados pelos grãos das diversas regiões das amostras, foram empregados os métodos de análise de variância e de teste da diferença entre duas médias.

As comparações e testes foram realizados entre as regiões de uma mesma amostra para verificarem-se as diferenças apresentadas e, também, entre as mesmas regiões de amostras diferentes, para verificarem-se as influências dos parâmetros do processo, e da espessura e teor de carbono do material.

H1 - Análise de variância – ANOVA

O método da análise da variância permite verificar se as médias de diversos tratamentos são diferentes ou não, mas não possibilita verificar quais delas divergem [110]. Através do emprego de hipóteses, as quais devem ser comprovadas ou rejeitadas pela aplicação de critérios, pode-se determinar se as médias apresentadas pelas amostras são diferentes [111,112]. Tais hipóteses são chamadas de hipótese nula H_0 e hipótese alternativa H_A . Os critérios para estas hipóteses são:

$$H_0 = F < F \text{ crítico};$$

$$H_A = F \geq F \text{ crítico};$$

onde:

F = razão de variâncias (calculado);

F crítico = razão de variâncias crítica (tabelado).

Para atestar as hipóteses compara-se o valor calculado de F com o valor de F crítico. Toda vez que o valor de F for igual ou maior que F crítico, rejeita-se a hipótese nula H_0 de que as médias são iguais, e admite-se que estas sejam diferentes aceitando-se a hipótese alternativa H_A .

Nas tabelas a seguir são apresentados, para algumas amostras, os resultados das análises de variância realizadas. Na aplicação do método supôs-se distribuição normal dos dados das amostras e dados não emparelhados.

Tabela 21 – Resumo e ANOVA entre os materiais-base empregados, referentes ao diâmetro dos grãos.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
A2	38	555,00	14,60	73,81
B2	54	651,33	12,06	73,96
B4	37	556,49	15,04	72,99
C4	74	815,87	11,02	50,85

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	570,17	3	190,05	2,91	0,03	2,64
Dentro dos grupos	12991,40	199	65,28			
Total	13561,60	202				

Tabela 22 – Resumo e ANOVA entre os materiais-base empregados, referentes ao fator de forma dos grãos.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
A2	37	23,19	0,62	0,02
B2	52	32,33	0,62	0,03
B4	37	24,64	0,66	0,02
C4	73	46,08	0,63	0,02

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,04	3	0,01	0,54	0,65	2,65
Dentro dos grupos	5,69	195	0,02			
Total	5,74	198				

Tabela 23 – Resumo e ANOVA entre as Regiões 1, 2, 3 e 4 da amostra A215, referentes ao diâmetro dos grãos.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
R1	372	2138,89	5,74	8,37
R2	363	2110,23	5,81	7,26
R3	381	2280,71	5,98	8,85
R4	224	1453,51	6,48	11,60

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	87,17	3	29,05	3,32	0,01	2,61
Dentro dos grupos	11689,77	1336	8,74			
Total	11776,94	1339				

Tabela 24 – Resumo e ANOVA entre as Regiões 1, 2, 3 e 4 da amostra A215, referentes ao fator de forma dos grãos.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
R1	364	246,85	0,67	0,01
R2	364	237,38	0,65	0,01
R3	377	232,26	0,61	0,02
R4	228	138,02	0,60	0,02

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,07	3	0,35	18,39	1,07E-11	2,61
Dentro dos grupos	25,80	1329	0,01			
Total	26,87	1332				

Tabela 25 – Resumo e ANOVA entre as Regiões 1, 2, 3 e 4 da amostra A224, referentes ao diâmetro dos grãos.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
R1	455	2308,67	5,07	6,33
R2	665	2872,28	4,31	4,39
R3	321	2047,99	6,38	11,47
R4	349	2250,34	6,44	12,72

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1497,25	3	499,08	64,15	2,14E-39	2,60
Dentro dos grupos	13893,21	1786	7,77			
Total	15390,47	1789				

Tabela 26 – Resumo e ANOVA entre as Regiões 1, 2, 3 e 4 da amostra A224, referentes ao fator de forma dos grãos.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
R1	451	315,04	0,69	0,01
R2	658	459,00	0,69	0,01
R3	319	206,40	0,64	0,02
R4	347	210,68	0,60	0,02

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2,40	3	0,80	43,78	2,72E-27	2,60
Dentro dos grupos	32,42	1771	0,01			
Total	34,83	1774				

Tabela 27 – Resumo e ANOVA entre as Regiões 1, 2, 3 e 4 da amostra A233, referentes ao diâmetro dos grãos.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
R1	862	3389,24	3,93	3,03
R2	689	2965,47	4,30	4,06
R3	454	2485,12	5,47	8,61
R4	324	2153,80	6,64	15,14

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2116,48	3	705,49	115,46	1,06E-69	2,60
Dentro dos grupos	14205,36	2325	6,10			
Total	16321,85	2328				

Tabela 28 – Resumo e ANOVA entre as Regiões 1, 2, 3 e 4 da amostra A233, referentes ao fator de forma dos grãos.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
R1	860	603,89	0,70	0,01
R2	687	476,28	0,69	0,01
R3	451	296,05	0,65	0,02
R4	322	192,65	0,59	0,02

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2,91	3	0,97	49,71	3,93E-31	2,60
Dentro dos grupos	45,22	2316	0,01			
Total	48,13	2319				

Tabela 29 – Resumo e ANOVA da Região 1 das amostras A215, A224 e A233, referentes ao diâmetro dos grãos.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
A215R1	372	2138,89	5,74	8,37
A224R1	455	2308,67	5,07	6,33
A233R1	862	3389,24	3,93	3,03

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	976,11	2	488,05	95,68	4,36E-40	3,00
Dentro dos grupos	8600,05	1686	5,10			
Total	9576,16	1688				

Tabela 30 – Resumo e ANOVA da Região 1 das amostras A215, A224 e A233, referentes ao fator de forma dos grãos.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
A215R1	364	246,85	0,67	0,01
A224R1	451	315,04	0,69	0,01
A233R1	860	603,89	0,70	0,01

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,15	2	0,07	4,56	0,01	3,00
Dentro dos grupos	27,80	1672	0,01			
Total	27,95	1674				

Tabela 31 – Resumo e ANOVA da Região 2 das amostras A215, A224 e A233, referentes ao diâmetro dos grãos.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
A215R2	363	2110,23	5,81	7,26
A224R2	665	2872,28	4,31	4,39
A233R2	689	2965,47	4,30	4,06

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	645,71	2	322,85	66,33595	1,78E-28	3,00
Dentro dos grupos	8342,03	1714	4,86			
Total	8987,80	1716				

Tabela 32 – Resumo e ANOVA da Região 2 das amostras A215, A224 e A233, referentes ao fator de forma dos grãos.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
A215R2	364	237,38	0,65	0,01
A224R2	658	459,00	0,69	0,01
A233R2	687	476,28	0,69	0,01

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,54	2	0,27	15,16	2,95E-07	3,00
Dentro dos grupos	30,44	1706	0,01			
Total	30,98	1708				

Tabela 33 – Resumo e ANOVA da Região 3 das amostras A215, A224 e A233, referentes ao diâmetro dos grãos.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
A215R3	381	2280,71	5,98	8,85
A224R3	321	2047,99	6,38	11,47
A233R3	454	2485,12	5,47	8,61

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	159,21	2	79,60	8,39	0,0002	3,00
Dentro dos grupos	10938,03	1153	9,48			
Total	11097,24	1155				

Tabela 34 – Resumo e ANOVA da Região 3 das amostras A215, A224 e A233, referentes ao fator de forma dos grãos.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
A215R3	377	232,26	0,61	0,02
A224R3	319	206,40	0,64	0,02
A233R3	451	296,05	0,65	0,02

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,35	2	0,17	8,50	0,0002	3,00
Dentro dos grupos	23,74	1144	0,02			
Total	24,09	1146				

Tabela 35 – Resumo e ANOVA da Região 4 das amostras A215, A224 e A233, referentes ao diâmetro dos grãos.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
A215R4	224	1453,51	6,48	11,60
A224R4	349	2250,34	6,44	12,72
A233R4	324	2153,80	6,64	15,14

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	7,20	2	3,60	0,27	0,76	3,00
Dentro dos grupos	11908,17	894	13,32			
Total	11915,37	896				

Tabela 36 – Resumo e ANOVA da Região 4 das amostras A215, A224 e A233, referentes ao fator de forma dos grãos.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
A215R4	228	138,02	0,60	0,02
A224R4	347	210,68	0,60	0,02
A233R4	322	192,65	0,59	0,02

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,01	2	0,007	0,29	0,74	3,00
Dentro dos grupos	21,45	894	0,02			
Total	21,46	896				

H2 - Comparação de médias duas a duas

Quando a análise de variância mostra que as médias dos tratamentos não são estatisticamente iguais necessita-se de um método que forneça a diferença mínima significativa entre elas. Sendo o valor absoluto da diferença entre duas médias igual ou superior a diferença mínima significativa, as médias são consideradas estatisticamente diferentes, ao nível de significância estabelecido [111].

Como método para fornecer a diferença mínima significativa entre duas médias empregou-se o Teste Tukey, com um nível de significância de 5%.

Para determinar a diferença mínima significativa de médias de tratamentos possuindo dados não emparelhados emprega-se a equação 20 [111] a seguir:

$$d.m.s. = q \sqrt{\left(\frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_j}\right) \frac{QMR}{2}} \quad (20)$$

onde:

d.m.s.: diferença mínima significativa;

q: valor tabelado ao nível de significância estabelecido (tabela 37), associado ao número de tratamentos e aos graus de liberdade do resíduo;

r_i e r_j : número de repetições de cada tratamento;

QMR: quadrado médio de resíduo da análise de variância.

Além do teste Tukey, empregou-se também o teste z [111,112] para determinar com mais segurança se duas médias são diferentes ou não, quando a

diferença absoluta entre as médias se aproxima da diferença mínima significativa calculada. Estas médias estão destacadas nas tabelas com um asterisco (*).

Nas tabelas a seguir são apresentados, para algumas médias de amostras comparadas, os valores encontrados para a diferença mínima significativa (d.m.s.).

Tabela 37 – Valores da amplitude total estudentizada (q) para $\alpha = 5\%$, segundo o número de tratamentos (k) e os graus de liberdade do resíduo [111]. Parcial.

Nº de graus de liberdade do resíduo	Número de tratamentos (k)				
	2	3	4	5	6
1	18,0	27,0	32,8	37,1	40,4
2	6,08	8,33	9,80	10,9	11,7
3	4,50	5,91	6,82	7,50	8,04
4	3,93	5,04	5,76	6,29	6,71
...
40	2,86	3,44	3,79	4,04	4,23
60	2,83	3,40	3,74	3,98	4,16
120	2,80	3,36	3,68	3,92	4,10
∞	2,77	3,31	3,63	3,86	4,03

Tabela 38 – Resultados do teste Tukey de comparação das médias do diâmetro dos grãos dos materiais-base empregados.

Amostras	Diferença absoluta entre as médias	Diferença mínima significativa - d.m.s	São significativamente diferentes
A2 - B2	2,54	4,39	não
A2 - B4	0,43	4,78	não
A2 - C4	3,58	4,13	sim *
B2 - B4	2,97	4,42	não
B2 - C4	1,03	3,71	não
B4 - C4	4,01	4,17	sim *

* - ver observação no texto.

Tabela 39 – Resultados do teste Tukey de comparação das médias do fator de forma dos grãos dos materiais-base empregados.

Amostras	Diferença absoluta entre as médias	Diferença mínima significativa - d.m.s	São significativamente diferentes
A2 - B2	0,005	0,09	não
A2 - B4	0,03	0,10	não
A2 - C4	0,004	0,08	não
B2 - B4	0,04	0,09	não
B2 - C4	0,009	0,08	não
B4 - C4	0,03	0,08	não

Tabela 40 – Resultados do teste Tukey de comparação individual entre as médias do diâmetro dos grãos das diferentes regiões analisadas nas amostras A215, A224 e A233.

Amostras	Diferença absoluta entre as médias	Diferença mínima significativa - d.m.s	São significativamente diferentes
A215R1-A215R2	0,06	0,56	não
A215R1-A215R3	0,23	0,55	não
A215R1-A215R4	0,73	0,64	sim
A215R2-A215R3	0,17	0,55	não
A215R2-A215R4	0,67	0,64	sim
A215R3-A215R4	0,50	0,63	não
A224R1-A224R2	0,75	0,43	sim
A224R1-A224R3	1,30	0,52	sim
A224R1-A224R4	1,37	0,50	sim
A224R2-A224R3	2,06	0,48	sim
A224R2-A224R4	2,12	0,47	sim
A224R3-A224R4	0,06	0,55	não
A233R1-A233R2	0,37	0,32	sim
A233R1-A233R3	1,54	0,36	sim
A233R1-A233R4	2,71	0,41	sim
A233R2-A233R3	1,16	0,38	sim
A233R2-A233R4	2,34	0,42	sim
A233R3-A233R4	1,17	0,46	sim

Tabela 41– Resultados do teste Tukey de comparação entre as médias do diâmetro dos grãos das mesmas regiões analisadas nas amostras A215, A224 e A233.

Amostras	Diferença absoluta entre as médias	Diferença mínima significativa - d.m.s	São significativamente diferentes
A215R1-A224R1	0,67	0,36	sim
A215R2-A224R2	1,49	0,33	sim
A215R3-A224R3	0,56	0,54	não*
A215R4-A224R4	0,04	0,73	não
A215R1-A233R1	1,81	0,32	sim
A215R2-A233R2	1,50	0,33	sim
A215R3-A233R3	0,51	0,50	sim
A215R4-A233R4	0,15	0,74	não
A224R1-A233R1	1,14	0,30	sim
A224R2-A233R2	0,01	0,32	não
A224R3-A233R3	0,90	0,52	sim
A224R4-A233R4	0,19	0,65	não

* - ver observação no texto.

Tabela 42 – Resultados do teste Tukey de comparação individual entre as médias do fator de forma dos grãos das diferentes regiões analisadas nas amostras A215, A224 e A233.

Amostras	Diferença absoluta entre as médias	Diferença mínima significativa - d.m.s	São significativamente diferentes
A215R1-A215R2	0,02	0,02	sim*
A215R1-A215R3	0,06	0,02	não
A215R1-A215R4	0,07	0,03	sim
A215R2-A215R3	0,03	0,02	sim
A215R2-A215R4	0,04	0,03	sim
A215R3-A215R4	0,01	0,03	não
A224R1-A224R2	0,0009	0,02	não
A224R1-A224R3	0,05	0,02	sim
A224R1-A224R4	0,09	0,02	sim
A224R2-A224R3	0,05	0,02	sim
A224R2-A224R4	0,09	0,02	sim
A224R3-A224R4	0,03	0,02	sim
A233R1-A233R2	0,008	0,01	não
A233R1-A233R3	0,04	0,02	sim
A233R1-A233R4	0,10	0,02	sim
A233R2-A233R3	0,03	0,02	sim
A233R2-A233R4	0,09	0,02	sim
A233R3-A233R4	0,05	0,02	sim

* - ver observação no texto.

Tabela 43 – Resultados do teste Tukey de comparação entre as médias do fator de forma dos grãos das mesmas regiões analisadas nas amostras A215, A224 e A233.

Amostras	Diferença absoluta entre as médias	Diferença mínima significativa - d.m.s	São significativamente diferentes
A215R1-A224R1	0,02	0,02	sim*
A215R2-A224R2	0,04	0,02	sim
A215R3-A224R3	0,005	0,02	não
A215R4-A224R4	0,001	0,03	não
A215R1-A233R1	0,02	0,01	sim
A215R2-A233R2	0,04	0,02	sim
A215R3-A233R3	0,04	0,02	sim
A215R4-A233R4	0,007	0,03	não
A224R1-A233R1	0,003	0,01	não
A224R2-A233R2	0,004	0,01	não
A224R3-A233R3	0,009	0,02	não
A224R4-A233R4	0,008	0,02	não

* - ver observação no texto.