PATRÍCIA ALVES BARBOSA

FURAÇÃO DE FERROS FUNDIDOS AUSTEMPERADOS E NODULAR PERLÍTICO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2009

PATRÍCIA ALVES BARBOSA

FURAÇÃO DE FERROS FUNDIDOS AUSTEMPERADOS E NODULAR PERLÍTICO

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Álisson Rocha Machado

Co-Orientador: Prof. Dr. Éder Silva Costa

UBERLÂNDIA – MG
2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

B238f Barbosa, Patrícia Alves, 1979-
Furação de ferros fundidos austemperados e nodular perlítico / Patrícia Alves Barbosa. - 2009.
124 f. : il.

Orientador: Álisson Rocha Machado.
Co-orientador: Éder Silva Costa.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Usinagem - Teses. 2. Furação - Teses. 3. Ferro fundido - Teses. I. Machado, Álisson Rocha. II. Costa, Éder Silva, 1965- III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621.9

Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
Av . João Naves de Ávila, 2121 - 38400-902 Fone: 0XX(34)32394149 Ramal 42
FAX: 0XX(34)32394282 – Campus Santa Mônica - Uberlândia MG

ALUNA: Patrícia Alves Barbosa

NÚMERO DE MATRÍCULA: 90537

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Materiais e Processos de Fabricação

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL MESTRADO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:

"Furação de Ferros Fundidos Austemperados e Nodular Perlítico"

ORIENTADOR: Prof. Dr. Álisson Rocha Machado

A Dissertação foi **APROVADA** em reunião pública, realizada no Anfiteatro do Bloco 1X, Campus Santa Mônica, em 10 de julho de 2009, às 08:30 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

NOME		ASSINATURA
Prof. Dr. Álisson Rocha Machado	UFU	
Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva	UFU	
Prof. Dr. Paulo André de Camargo Beltrão	UTFPR	

Uberlândia, 10 de julho de 2009

Ao meu filho Rafael,

E principalmente ao meu noivo Marcelo

Pelo amor, paciência, apoio e incentivo inquestionáveis.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Álisson Rocha Machado pela oportunidade, orientação e incentivos no desenvolvimento deste trabalho.

Ao LEPU, aos professores Éder Costa Silva e Helder B. Lacerda, ao técnico Reginaldo Souza e aos alunos de iniciação científica, pela ajuda no desenvolvimento dos testes práticos.

Ao LTM, em especial à Ângela Maria da Silva Andrade, pela amizade e auxilio na preparação dos corpos de prova e medições de microdureza.

À Tupy S.A., principalmente ao Sr. Wilson Luiz Guesser, pelo incentivo e fornecimento dos materiais inerentes à pesquisa.

À Sandvik do Brasil S.A pela colaboração no fornecimento das ferramentas.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade de realizar este curso.

A Capes, pelo apoio financeiro, através da concessão da bolsa de estudo.

Ao meu filho Rafael, pela compreensão durante os períodos de ausência dedicados a pesquisa.

Ao meu noivo, Marcelo Bertolete Carneiro, pelo amor, dedicação, paciência, incentivo e principalmente por me mostrar um lindo caminho a seguir na minha vida profissional.

Aos meus familiares em especial a minha avó Liberaci Arantes Alves, meus pais Valterli Sebastião Barbosa e Joana D’arc Alves Barbosa e a minha irmã Daniella Alves Barbosa, pelo carinho dedicado ao meu filho e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

BARBOSA, P. A. **Furação de Ferros Fundidos Austemperados e Nodular Perlítico.** 2009. 124f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

Resumo

Muitos materiais apresentam melhoras em suas propriedades mecânicas através de tratamentos térmicos, mas isso pode acarretar mudanças na sua estrutura, com prejuízo para a usinabilidade, como o caso do ferro fundido nodular austemperado (ADI), que apesar de apresentar melhores propriedades mecânicas, possui uma maior dificuldade de usinagem quando comparado com o ferro fundido nodular convencional e aços de resistência similar. Por se tratar de um material que surgiu recentemente como um dos principais materiais de engenharia, tem-se intensificado pesquisas sobre o comportamento dos ADIs. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é comparar a usinabilidade de três materiais: o ferro fundido nodular perlítico bruto-de-fundição (FE 70003) e duas classes de ferros fundidos nodulares austemperados com diferentes temperaturas e tempos de austenitização, o ISO 1.050-6 e o ISO 800-10. Para tanto foi utilizado o processo de furação, segundo um planejamento fatorial, variando-se as condições de corte, tipo de aplicação de fluido de corte e o material, todos em dois níveis. Esta comparação se deu através de testes de força constante, do monitoramento da taxa de desgaste da ferramenta, forças de usinagem, potência consumida e vibração em ensaios de longa duração, e qualidade da superfície dos furos produzidos. Os resultados mostraram que o ADI da classe 800-10 (207 HB) apresentou melhor usinabilidade, seguido pelo ferro fundido nodular FE70003 (263 HB). O ferro fundido austemperado da classe ISO 1.050-6 (288 HB) se mostrou como o material mais difícil de usinar. Observou-se que a usinabilidade dos ferros fundidos estudados está diretamente relacionada com os diferentes tratamentos térmicos a que estes foram submetidos, conferindo diferentes microestruturas que por sua vez promovem alterações nos valores de dureza.

Palavras Chave: Furação. Usinabilidade. Ferro fundido austemperado. Ferro fundido nodular perlítico. Qualidade da superfície.

BARBOSA, P. A. **Machinability of Austempered Ductile Irons and Pearlitic Ductile Iron in Drilling Process.** 2009. 124f. M.Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brazil.

Abstract

Many materials have mechanical proprieties improved by heat treatments, but this can cause changes in the structure of the material, worsening its machinability, as in the case of austempered ductile iron (ADI) that despite of presenting better mechanical proprieties it has lower machinability when compared with the conventional ductile iron and steel of similar strength. Being an excellent engineering material recently developed research about ADI behavior has been intensified. In this direction the present work was developed. The aim is to compare the machinability, in drilling process, of three materials: a perlitic ductile iron as cast (FE70003) and two grades of austempered ductile iron with different temperatures and times of austenitization: the ISO 1.050-6 and the ISO 800-10. To compare the machinability of these materials experimental tests were carried out, following a 2^4 factorial planning, consisting of two quantitative variable: cutting speed (Vc) and feed rate (f) and two qualitative variable: work material and cutting fluid application technique. The machinability was expressed by the length of the drilled holes in constant pressure tests and tool wear, cutting forces, power consumption, vibration and surface quality of the holes produced by the long tool life tests. The results showed that the ADI grade ISO 800-10 (207 HB) was the material with higher machinability, followed by the ductile iron grade FE70003 (263 HB) and by the ADI grade ISO 1.050-6 (288 HB) which showed the worst machinability. The machinability of the materials studied are therefore closely related to the heat treatments that they were submitted, producing different microstructures and hardness.

Keywords: Drilling process. Machinability. Austempered ductile iron. Pearlitic ductile iron. Quality surface

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Microestrutura das diversas classes de ferros fundidos: (a) ferro fundido cinzento, (b) ferro fundido branco, (c) ferro fundido maleável (Callister Jr, 2002); (d) ferro fundido nodular (Tupy S.A.); (e) ferro fundido de grafita compactada (vermicular) (Mocellin et al., 2004)..... 5

Figura 2.2 - Ciclo de tratamento térmico de austêmpera..... 8

Figura 2.3 - Diagrama esquemático de transformação de fase durante a austêmpera Adaptado de Wu et al., 2002..... 10

Figura 2.4 - Usinabilidade relativa de alguns materiais ferrosos (Adaptado de Cakir et. al., 2005) 13

Figura 2.5 - Esquema relacionado à quantidade de austenita estável e dureza Brinell em função do tempo de transformação (Lussoli, 2003) 15

Figura 2.6 - Esquema das variantes do processo de furação: (a) furação em cheio, (b) escareamento ou furação com pré-furo, (c) furação escalonada, (d) furação de centros e (e) trepanação, adaptado de Ferraresi, 2003 17

Figura 2.7 - Tipos de rebarbas. a) uniforme; b) transição; c) coroa, (Min et al., 2001)..... 21

Figura 2.8 - Tipos de Brocas: (a) broca centro, (b) brocas intercambiáveis, (c) broca helicoidal e (d) brocas canhão 26

Figura 2.9 - Partes de uma broca helicoidal (ABNT NBR 6176, citado por Diniz et al., 2002) 28

Figura 2.10 - Diagrama de distribuição dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte (Vierege,1970, citado por König e Klocke, 1997) 30

Figura 2.11 - Mapeamento dos mecanismos de desgaste de flanco para brocas de aço-rápido na usinagem da liga AlSi9Cu3 sem fluido de corte, diâmetro da broca 5,4 mm (Zhang et al., 2001)..... 31

Figura 2.12 - Evolução do desgaste em brocas helicoidais: (1) desgaste inicial, (2) desgaste leve – regular, (3) desgaste moderado por microlascamentos, (4) desgaste severo e (5) colapso (Ertunc et al., 2001) 31

Figura 2.13 - Forma de desgaste em brocas helicoidais: (a) desgaste de flanco, (b) desgaste nas guias, (c) desgaste de cratera e (d) lascamento (Bork, 1995) 32

Figura 2.14 - Representação das forças de usinagem em furação (Bork, 1995 citado por Mocellin, 2002) 33

Figura 2.15 - Representação esquemática das formas de aplicação de fluido de corte (Santos, 2002) 36

Figura 2.16 - "Tempo de usinagem x desgaste de flanco" para as três camadas do material A (Guesser et al., 2000) 40

Figura 2.17 - "Tempo de usinagem x desgaste de flanco" para as três camadas do material B (Guesser et al., 2000) 41

Figura 2.18 - Sistema considerado como uma função ligando fatores às respostas (De Barros Neto et al., 1995) 42

Figura 3.1 - Fluxograma da Metodologia Experimental 45

Figura 3.2 - Micrografias representativas da amostra DI, (periferia, médio raio e núcleo), onde se observa o nódulo de grafita e a matriz perlítica com pouca ferrita. Ataque Nital 3% 48

Figura 3.3 - Micrografias representativas da amostra ADI I, (periferia, médio raio e núcleo), onde se observa o nódulo de grafita e a matriz bainítica. Ataque Nital 3% 48

Figura 3.4 - Micrografias representativas da amostra ADI II, (periferia, médio raio e núcleo), onde se observa na periferia: nódulos de grafita e a matriz ferrita com bainita. No médio raio e no núcleo: nódulos de grafita e a matriz bainítica com ferrita e resíduos de perlita fina. Ataque Nital 3% 48

Figura 3.5 - Suporte para fixação do corpo de prova no barramento da máquina-ferramenta. (a) vista superior, (b) vista frontal 49

Figura 3.6 - Broca utilizada nos experimentos (Sandvik Coromant, 2008) 49

Figura 3.7 - Revestimento TiN/TiAlN multicamada (Sandvik Coromant, 2008) 50

Figura 3.8 - Esquema do equipamento utilizado no teste de pressão constante 50

Figura 3.9 - Centro de Usinagem CNC Discovery 760, utilizado nos testes de furação 52

Figura 3.10 - Dimensões e distribuição dos furos passantes no corpo de prova 54

Figura 3.11 - Seqüência dos ciclos de furação no corpo de prova 54

Figura 3.12 - Configuração do tipo de aplicação do fluido de corte: (a) dois bicos – MQF, (b) três bicos – Jorro 55

Figura 3.13 - Furos destacados em vermelho utilizados para o monitoramento da potência consumida e vibração 55

Figura 3.14 - Diagrama esquemático para monitoramento dos sinais de vibração e potência 56

Figura 3.15 - Diagrama esquemático para monitoramento dos sinais de força de avanço e torque 57

Figura 3.16 - Furos destacados em azul utilizados para o monitoramento de força de avanço e torque 58

Figura 3.17 - Foto esquemática do aparato experimental utilizado para o monitoramento de desgaste da ferramenta, contendo microscópio, software analisador de imagens e suporte para o posicionamento da ferramenta..... 58

Figura 3.18 - Furos destacados em verde indicam as interrupções para medição dos desgastes das brocas 59

Figura 3.19 - Rugosímetro surftronic 3+ da Taylor Hobson em posição de funcionamento 59

Figura 3.20 - Furos selecionados para medição da rugosidade (destacados em lilás) e ampliação do furo 54 esquematizando os planos de medição para cada furo 60

Figura 3.21 - Modelo esquemático de localização das identações realizadas nos ensaios de microdureza 61

Figura 3.22 - Microdurômetro Shimadzu e software HMV-AD 62

Figura 4.1 - Comprimento médio de penetração (L_f médio) em função da força de avanço (F_f) para a menor rotação..... 64

Figura 4.2 - Comprimento médio de Penetração (L_f médio) em função da Força de Avanço (F_f) para a maior rotação..... 65

Figura 4.3 - Desgaste da aresta transversal da ferramenta após furar o material ADI I. (a) Broca desgastada, (b) Ampliação da região A da broca desgastada 66

Figura 4.4 - Desgaste da aresta transversal da ferramenta após furar o material ADI I em réplica. (a) Broca desgastada, (b) Ampliação da região A da broca desgastada..... 66

Figura 4.5 - Desgaste da ferramenta na usinagem do DI com Vc = 140 m/min; f = 0,25 mm/volta e aplicação de fluido de corte por jorro com aumento de 45x; (a), (b) e (c) apresentam a evolução do desgaste de flanco onde (a) desgaste de flanco, (b) e (c) desgaste de flanco com lascamento; (d), (e) e (f) mostram os outros tipos de desgastes observados ao longo do teste onde (d) desgaste da guia, (e) e (f) lascamento na superfície de saída 70

Figura 4.6 - Desgaste da ferramenta na usinagem do ADI I com Vc = 140 m/min; f = 0,25 mm/volta e aplicação de fluido de corte por jorro; (a) desgaste de flanco com lascamento, (b) desgaste na guia, (c) desgaste na superfície de saída (lascamento), (d), (e) e (f) colapso da ferramenta (deformação plástica); (a), (b) e (c) aumento de 45x; (d), (e) e (f) aumento de 10x 71

Figura 4.7 - Desgaste da ferramenta na usinagem do ADI II com Vc = 110 m/min; f = 0,15 mm/volta e aplicação de fluido de corte por MQF; aumento de 45x; (a), (b) e (c) evolução do desgaste de flanco 71

Figura 4.8 - Evolução do desgaste de flanco máximo para as diferentes condições de corte estudadas; (a) DI com sistema de aplicação de fluido de corte por jorro, (b) DI com sistema lubri-refrigerante por MQF, (c) ADI I com jorro, (d) ADI I com MQF, (e) ADI II com jorro e (f) ADI II com MQF 72

Figura 4.9 - Gráfico comparativo de $VB_{Bmáx}$ em função das condições de corte para aplicação de fluido de corte com jorro em abundância 74

Figura 4.10 - Gráfico comparativo de VBBmáx em função das condições de corte para aplicação de fluido de corte por MQF 74

Figura 4.11 - Evolução da Força de avanço (F_Z) e torque (M_Z), referentes ao DI, ao longo do teste para as diferentes condições de corte estudadas; (a) F_Z para ensaios com aplicação de fluido de corte por jorro, (b) F_Z para MQF, (c) M_Z para jorro e (d) M_Z para MQF 78

Figura 4.12 - Evolução da Força de avanço (F_Z) e torque (M_Z), referentes ao ADI I, ao longo do teste para as diferentes condições de corte estudadas; (a) F_Z para ensaios com aplicação de fluido de corte por jorro, (b) F_Z para MQF, (c) M_Z para jorro e (d) M_Z para MQF 78

Figura 4.13 - Evolução da Força de avanço (F_Z) e torque (M_Z), referentes ao ADI II, ao longo do teste para as diferentes condições de corte estudadas; (a) F_Z para ensaios com aplicação de fluido de corte por jorro, (b) F_Z para MQF, (c) M_Z para jorro e (d) M_Z para MQF 79

Figura 4.14 - Gráfico comparativo de F_Z, para aplicação de fluido de corte com jorro em abundância nas condições de corte estudadas 81

Figura 4.15 - Gráfico comparativo de F_Z, para aplicação de fluido de corte por MQF nas condições de corte estudadas 81

Figura 4.16 - Gráfico comparativo de M_Z, para aplicação de fluido de corte com jorro em abundância nas condições de corte estudadas..... 82

Figura 4.17 - Gráfico comparativo de M_Z, para aplicação de fluido de corte por MQF nas condições de corte estudadas 82

Figura 4.18 - Potência de Corte e vibração RMS, referentes ao DI, ao longo do teste para as diferentes condições de corte estudadas, (a) P_C para ensaios com aplicação de fluido de corte por jorro, (b) P_C para MQF, (c) Vibração para jorro e (d) Vibração para MQF 87

Figura 4.19 - Potência de Corte e vibração RMS, referentes ao ADI I, ao longo do teste para as diferentes condições de corte estudadas, (a) P_C para ensaios com aplicação de fluido de corte por jorro, (b) P_C para MQF, (c) Vibração para jorro e (d) Vibração para MQF 88

Figura 4.20 - Potência de Corte e vibração RMS, referentes ao ADI II, ao longo do teste para as diferentes condições de corte estudadas, (a) P_C para ensaios com aplicação de fluido de corte por jorro, (b) P_C para MQF, (c) Vibração para jorro e (d) Vibração para MQF 88

Figura 4.21 - Gráfico comparativo da potência de corte média para aplicação de fluido de corte por jorro nas condições de corte estudadas..... 91

Figura 4.22 - Gráfico comparativo da potência de corte média para aplicação de fluido de corte por MQF nas condições de corte estudadas 91

Figura 4.23 - Gráfico comparativo da vibração RMS média para aplicação de fluido de corte por jorro nas condições de corte estudadas..... 92

Figura 4.24 - Gráfico comparativo da vibração RMS média para aplicação de fluido de corte por MQF nas condições de corte estudadas..... 92

Figura 4.25 - Resultados de Ra ao longo do teste para as diferentes condições de corte para os materiais estudados, (a) Ra para ensaios referentes ao DI com aplicação de fluido de corte por jorro, (b) Ra para DI com MQF, (c) Ra para ensaios referentes ao ADI I com aplicação de fluido de corte por jorro (d) Ra para ADI I com MQF, (e) Ra para ensaios referentes ao ADI II com aplicação de fluido de corte por jorro e (f) Ra para ADI II com MQF 98

Figura 4.26 - Resultados de Rt ao longo do teste para as diferentes condições de corte para os materiais estudados, (a) Rt para ensaios referentes ao DI com aplicação de fluido de corte por jorro, (b) Rt para DI com MQF, (c) Rt para ensaios referentes ao ADI I com aplicação de fluido de corte por jorro (d) Rt para ADI I com MQF, (e) Rt para ensaios

referentes ao ADI II com aplicação de fluido de corte por jorro e (f) Rt para ADI II com MQF 99

Figura 4.27 - Resultados de Rq ao longo do teste para as diferentes condições de corte para os materiais estudados, (a) Rq para ensaios referentes ao DI com aplicação de fluido de corte por jorro, (b) Rq para DI com MQF, (c) Rq para ensaios referentes ao ADI I com aplicação de fluido de corte por jorro (d) Rq para ADI I com MQF, (e) Rq para ensaios referentes ao ADI II com aplicação de fluido de corte por jorro e (f) Rq para ADI II com MQF 100

Figura 4.28 - Gráfico comparativo de rugosidade Ra, para aplicação de fluido de corte por jorro nas condições de corte estudadas..... 102

Figura 4.29 - Gráfico comparativo de rugosidade Ra, para aplicação de fluido por MQF nas condições de corte estudadas 102

Figura 4.30 - Gráfico comparativo de rugosidade Rq, para aplicação de fluido por jorro nas condições de corte estudadas 103

Figura 4.31 - Gráfico comparativo de rugosidade Rq, para aplicação de fluido por MQF nas condições de corte estudadas 103

Figura 4.32 - Gráfico comparativo de rugosidade Rt, para aplicação de fluido por jorro nas condições de corte estudadas 104

Figura 4.33 - Gráfico comparativo de rugosidade Rt, para aplicação de fluido por MQF nas condições de corte estudadas 104

Figura 4.34 - Gráficos de microdureza para os ADIs, com aplicação de fluido de corte por jorro e comprimento de perfuração (L_f) de 15 mm, com dados referentes ao fundo do furo e lateral direita (L.D.), para Vc = 140 m/min, f = 0,25 mm/volta..... 109

Figura 4.35 - Gráficos de microdureza para os ADIs, com aplicação de fluido de corte por MQF e comprimento de perfuração (L_f) de 15 mm, com dados referentes ao fundo do furo e lateral direita (L.D.), para Vc = 140 m/min, f = 0,25 mm/volta..... 110

Figura 4.36 - Regiões onde foram registradas as imagens da microestrutura do ADI I com aplicação de fluido de corte por jorro 111

Figura 4.37 - Microestruturas do ADI I para Vc = 140 m/min, f = 0,25 mm/volta, com aplicação de fluido de corte por jorro e L_f = 25 mm; aumento de 40x; (a) referência (meio da amostra), (b) quina direita, (c) fundo do furo, (d) lateral esquerda..... 111

Figura 4.38 - Regiões onde foram registradas as imagens da microestrutura do ADI I com aplicação de fluido de corte por MQF 112

Figura 4.39 - Microestruturas do ADI I para Vc = 140 m/min, f = 0,25 mm/volta, com aplicação de fluido de corte por MQF e L_f = 25 mm; aumento de 40x; (a) referência (meio da amostra), (b) quina direita, (c) lateral direita, (d) fundo do furo..... 112

Figura 4.40 - Regiões onde foram registradas as imagens da microestrutura do ADI II com aplicação de fluido de corte por jorro 113

Figura 4.41 - Microestruturas do ADI II para Vc = 140 m/min, f = 0,25 mm/volta, com aplicação de fluido de corte por jorro e L_f = 25 mm; aumento de 40x; (a) referência (meio da amostra), (b) quina direita, (c) fundo do furo, (d) lateral esquerda..... 113

Figura 4.42 - Regiões onde foram registradas as imagens da microestrutura do ADI II com aplicação de fluido de corte por MQF 114

Figura 4.43 - Microestruturas do ADI II para Vc = 140 m/min, f = 0,25 mm/volta, com aplicação de fluido de corte por MQF e L_f = 25 mm; aumento de 40x; (a) referência (meio da amostra), (b) quina direita, (c) lateral direita, (d) fundo do furo..... 114

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química dos ferros fundidos básicos para produção do ferro fundido nodular (Chiaverini, 2002) 6

Tabela 2.2 - Classificação do ferro fundido nodular, segundo a ABNT P-EB-585 (Chiaverini, 2002) 7

Tabela 2.3 - Composição e Características dos Aços Rápidos (Chiaverini, 2002) 22

Tabela 2.4 - Resultados dos testes de usinabilidade das ligas de ADI para Vc = 9,50 m/min e seção do cavaco de 0,25 mm^2 (Seah; Sharma, 1995) 38

Tabela 2.5 - Resultados dos testes de usinabilidade das ligas de ADI para Vc = 11,87 m/min e seção do cavaco de 0,25 mm^2 (Seah; Sharma, 1995) 38

Tabela 2.6 - Microdureza Vickers medida na matriz de diferentes amostras de virabrequins (Neri; Carreño, 2003) 39

Tabela 2.7 - Composições químicas dos materiais estudados (Guesser et al.,2000) 40

Tabela 2.8 - Resultados de dureza e de ensaios metalográficos dos materiais ensaiados (Guesser et al.,2000) 40

Tabela 2.9 - Matriz de Planejamento 2^4 43

Tabela 3.1 - Composição Química do Ferro Fundido Nodular Perlítico (ASTM FE 70003) 46

Tabela 3.2 - Características Metalográficas dos materiais de trabalho 47

Tabela 3.3 - Dureza Brinell dos materiais 47

Tabela 3.4 - Variáveis de entrada à dois níveis 51

Tabela 3.5 - Planejamento fatorial 2^3 51

Tabela 3.6 - Variáveis de entrada à dois níveis 53

Tabela 3.7 - Planejamento fatorial 2^4 51

Tabela 4.1 - Resultados médios de L_f 63

Tabela 4.2 - Análise de significância do Planejamento 2^3 comparando ADI I e ADI II 67

Tabela 4.3 - Análise de significância do Planejamento 2^3 comparando ADI II e DI 67

Tabela 4.4 - Análise de significância do Planejamento 2^3 comparando ADI I e DI 68

Tabela 4.5 - Resultados de $VB_{Bmáx}$ do último furo..... 73

Tabela 4.6 - Análise de significância do planejamento 2^4 realizado entre ADI I e ADI II com referência ao desgaste de Flanco máximo ($VB_{Bmáx}$) 75

Tabela 4.7 - Análise de significância do planejamento 2^4 realizado entre DI e ADI II com referência ao desgaste de Flanco máximo ($VB_{Bmáx}$) 76

Tabela 4.8 - Análise de significância do planejamento 2^4 realizado entre DI e ADI I com referência ao desgaste de Flanco máximo ($VB_{Bmáx}$) 76

Tabela 4.9 - Resultados médios de F_Z e M_Z 80

Tabela 4.10 - Análise de significância do planejamento 2^4 realizado entre ADI I e ADI II com referência à F_Z 83

Tabela 4.11 - Análise de significância do planejamento 2^4 realizado entre DI e ADI II com referência à F_Z 84

Tabela 4.12 - Análise de significância do planejamento 2^4 realizado entre DI e ADI I com referência à F_Z 84

Tabela 4.13 - Análise de significância do planejamento 2^4 realizado entre ADI I e ADI II com referência à M_Z 85

Tabela 4.14 - Análise de significância do planejamento 2^4 realizado entre DI e ADI II com referência à M_Z 86

Tabela 4.15 - Análise de significância do planejamento 2^4 realizado entre DI e ADI I com referência à M_Z 86

Tabela 4.16 - Resultados médios de potência de corte e vibração RMS..... 90

Tabela 4.17 - Análise de significância do planejamento 2^4 realizado entre ADI I e ADI II, baseado na potência de corte, média dos três primeiros furos executados no corpo de prova 93

Tabela 4.18 - Análise de significância do planejamento 2^4 realizado entre o DI e ADI II, baseado na potência de corte, média dos três primeiros furos executados no corpo de prova 94

Tabela 4.19 - Análise de significância do planejamento 2^4 realizado entre DI e ADI I, baseado na potência de corte, média dos três primeiros furos executados no corpo de prova 95

Tabela 4.20 - Análise de significância do planejamento 2^4 realizado entre ADI I e ADI II, baseado na vibração RMS, média dos três primeiros furos executados no corpo de prova 95

Tabela 4.21 - Análise de significância do planejamento 2^4 realizado entre o DI e ADI II, baseado na vibração RMS, média dos três primeiros furos executados no corpo de prova 96

Tabela 4.22 - Análise de significância do planejamento 2^4 realizado entre o DI e ADI I, baseado na vibração RMS, média dos três primeiros furos executados no corpo de prova 97

Tabela 4.23 - Valores médios de Rugosidade..... 101

Tabela 4.24 - Análise de significância entre ADI I e ADI II, baseado nos valores médios de Ra..... 105

Tabela 4.25 - Análise de significância entre ADI I e ADI II, baseado nos valores médios de Rq..... 105

Tabela 4.26 - Análise de significância entre ADI I e ADI II, baseado nos valores médios de Rt 105

Tabela 4.27 - Análise de significância entre DI e ADI II, baseado nos valores médios de Ra 106

Tabela 4.28 - Análise de significância entre DI e ADI II, baseado nos valores médios de Rq 107

Tabela 4.29 - Análise de significância entre DI e ADI II, baseado nos valores médios de Rt 107

Tabela 4.30 - Análise de significância entre DI e ADI I, baseado nos valores médios de Ra 108

Tabela 4.31 - Análise de significância entre DI e ADI I, baseado nos valores médios de Rq 108

Tabela 4.32 - Análise de significância entre DI e ADI I, baseado nos valores médios de Rt 108

LISTA DE SÍMBOLOS

ADI – Ferro Fundido Austemperado

α – Ângulo de Folga

APC – Aresta Postiça de Corte

Cm – Largura do Desgaste da Aresta Transversal [mm]

Ct – Ponto mais alto do Desgaste da Aresta Transversal [mm]

D – Diâmetro [mm]

δ – Ângulo de Hélice

DI – Ferro Fundido Nodular

f – Avanço [mm/volta]

Ø – Diâmetro da broca [mm]

F – Força de corte [N]

F_f – Força de Avanço [Kgf]

F_p – Força Passiva

FoFo – Ferro Fundido

H – Desgaste nas Guias [mm]

HB – Dureza Brinell

HV – Dureza Vickers

IT – Intervalo de Tolerância ou Qualidade de Trabalho

K – Número de Variáveis controladas no planejamento experimental

Kb – Desgste de cratera [mm]

KT – Profundidade da Cratera [mm]

K_c – pressão específica de corte [N/m²]

L – Comprimento [mm]

L_f – Profundidade de Penetração da broca [mm]

Meio Q.D. – Meio da Quina Direita

Meio Q.E. – Meio da Quina Esquerda

M_f – Momento Torsor [Nm]

MQF – Mínima Quantidade de Fluido

M_Z – Torque [Nm]

N – rotação [RPM]

N_c – Potência de Corte [CV]

N_e – Potência Efetiva de Corte [CV]

N_f – Potência de Avanço [CV]

P_c – Potência de Corte na Furação [KW]

Pm – Largura do Lascamento [mm]

Pt – Profundidade do Lascamento [mm]

Q.D. – Quina Direita

Q.E. – Quina Esquerda

R_a – Rugosidade média aritmética [μm]

Rq – Rugosidade RMS [μm]

Rt – Distância Vertical máxima entre o pico mais elevado e o vale mais profundo [μm]

σ – Ângulo de Ponta

T1 – Teste de microdureza na Lateral da Parede do Furo no ponto mais próximo da quina do furo

T2 – Teste de microdureza na Lateral da Parede do Furo num ponto intermediário

T3 – Teste de microdureza na Lateral da Parede do Furo no ponto mais afastado da quina do furo

TiN – Niterto de Titânio

TiAlN – Nitreto de Titânio Alumínio

VB – Desgaste de Flanco [mm]

VB_B – Desgaste de Flanco Médio [mm]

$VB_{Bmáx}$ – Desgaste de Flanco Máximo [mm]

Vc – Velocidade de Corte [m/min]

$\bar{y}_+$ – resposta média para o nível superior da variável

$\bar{y}_-$ – resposta média para o nível inferior da variável

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO 1

1.1 Objetivo do Trabalho 3

1.2 Estrutura do documento 3

CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4

2.1 Ferros Fundidos 4

2.1.1 Ferro Fundido Nodular 5

2.1.1.1 *Processo de Obtenção* 6

2.1.1.2 *Características e Propriedades* 7

2.1.1.3 *Aplicações* 7

2.1.2 Ferros Fundidos Austemperados (ADI) 8

2.1.2.1 *Processo de Obtenção* 8

2.1.2.2 *Características e Propriedades* 10

2.1.2.3 *Aplicações* 10

2.3 Usinabilidade dos Ferros Fundidos 11

2.3.1 Usinabilidade do Ferro Fundido Nodular 12

2.3.2 Usinabilidade do Ferro Fundido Nodular Austemperado (ADI) 12

2.3.3 Efeito da Microestrutura na Usinabilidade dos Ferros Fundidos Nodular e Austemperado 13

2.3.4 Tipos de Testes Empregados na Comparação da Usinabilidade 15

2.4 Furação de Ferro fundido Austemperado e Nodular Perlítico 16

2.4.1 Características do Processo de Furação 16

2.4.2 Qualidade dos Furos Usinados 18

2.4.3 Formação de Rebarbas 20

2.5 Ferramentas Empregadas na Usinagem de Ferro Fundido Austemperado e Nodular Perlitico 22

2.5.1 Aço Rápido 22

2.5.2 Metal Duro 24

2.5.3 Geometria da Ferramenta 26

2.6 Desgaste nas Ferramentas de Corte 29
2.6.1 Mecanismos de Desgaste 29
2.6.2 Desgaste em brocas helicoidais 31
2.7 Forças e Potências na Furação de Ferro Fundido Austemperado e Nodular Perlítico 33
2.7.1 Variáveis que Influenciam as Forças e a Potência na Usinagem de Ferro Fundido Austemperado e Nodular Perlítico 34
2.8 Fluidos de Corte Empregados na Usinagem de Ferro Fundido Austemperado e Nodular Perlítico 35
2.8.1 Métodos de Aplicação e Vazão de Fluidos de Corte na Furação 35
2.9 Pesquisas na usinagem de Ferro Fundido Austemperado e Nodular Perlítico ... 36
2.9.1 Principais Trabalhos na Área de Usinagem 37
2.10 Planejamento de Experimentos 41
2.10.1 Planejamento Fatorial Completo 41
2.10.1.1 *Planejamento Fatorial* 2^K 42
2.10.1.2 *Cálculo dos Efeitos Principais e de Interação das Variáveis* 44
CAPÍTULO III – METODOLOGIA EXPERIMENTAL 45
3.1 Aspectos Gerais 45
3.2 Material da Peça 46
3.3 Suporte para Fixação da Peça ao Barramento da Máquina-Ferramenta 48
3.4 Ferramenta de Corte 49
3.5 Teste de Pressão Constante (F_f) 50
3.6 Ensaios de Furação (Vida da Ferramenta) 52
3.6.1 Monitoramento da Potência de Corte e Vibração 55
3.6.2 Monitoramento da Força de Avanço (Fz) e Torque (Mz) 57
3.6.3 Taxa Monitoramento da Evolução do Desgaste 58
3.7 Qualidade dos Furos (Rugosidade) 59
3.8 Ensaios de Microdureza Complementares 60
3.8.1 Microdureza 61
3.8.2 Micrografia 61
CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES 63
4.1 Etapa 1: Teste de Pressão Constante 63
4.2 Etapa 2: Ensaios de Furação de Longa Duração 68
4.2.1 Evolução do Desgaste 69
4.2.2 Força de Avanço e Torque 77
4.2.3 Potência e Vibração 87

4.3 Etapa 3: Qualidade dos Furos (Rugosidade)..... 97
4.4 Etapa 4: Ensaios Complementares 109
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS..... 116
5.1 Conclusões 116
5.2 Propostas para Trabalhos Futuros 118
CAPÍTULO VI – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 119

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A grande maioria das publicações em usinagem (Trent; Wright, 2000; Diniz, et al., 2002 ; Ferraresi, 1981; Shaw, 1986; Machado et al., 2009) declara que *"A usinabilidade é definida como sendo uma grandeza que indica a facilidade ou dificuldade de se usinar um material"*. Mas deve-se salientar que esta não é uma propriedade do material e sim uma função do teste e das condições analisadas. Das grandezas consideradas inerentes ao processo que podem ser apresentadas como índices de usinabilidade estão: a força de corte, potência consumida, vida da ferramenta, acabamento da superfície, taxa de desgaste, temperatura de corte e controle do cavaco.

Uma grande contribuição de ensaios de usinabilidade é a possibilidade de geração de bancos de dados que é dificultada pela quantidade de materiais de processamento em geral e materiais de ferramenta, além dos processos de usinagem utilizados. Para maior confiabilidade destes bancos de dados devem-se utilizar critérios e procedimentos padronizados para que seja possível a transferência e utilização dos dados gerados, sem restrições (Machado et al., 2009).

No entanto, a maioria dos resultados de testes de usinabilidade publicados se referem ao torneamento, por isso o interesse em ampliar os estudos para outros processos de usinagem como a furação, que é o processo mais utilizado na indústria, cerca de 25% em tempo de usinagem e 33% em números de operação de todos os processos empregados (Santos, 2002).

Na indústria, o aumento na demanda pela busca de novos materiais está relacionado com o custo e a "eficiência/peso". No esforço de alcançar estas exigências empregam-se novos materiais com resistência similar, mas com baixa densidade ou aumenta-se a resistência de materiais tradicionais através da adição de elementos de liga ou por tratamento térmico. A escolha depende de parâmetros tais como, carregamentos mecânico e térmico ou condições de contorno como custos de manufatura, reciclagem, aceitação do

público e usinabilidade (Klocke et al., 2007). Nesta lista englobam-se os ferros fundidos que quase sempre oferecem boa usinabilidade e baixo custo de produção.

Segundo Chiaverini (2002) os ferros fundidos são classificados de acordo com a composição química e microestrutura, mais especificamente quanto à existência e a forma da grafita, em ferros fundidos cinzentos, brancos, maleáveis, nodulares, mesclados e de grafita compactada.

A história do ferro fundido dúctil tem sido influenciada por um número de desenvolvimentos técnicos que tem resultado nas novas oportunidades de negócios para as indústrias de fundição. Estes possuem boa fundibilidade, capacidade de amortecimento e propriedades mecânicas (ductilidade, tenacidade e resistência) e usinabilidade apropriada. Devido a estas vantagens têm sido utilizados em muitas aplicações estruturais. Cames, virabrequins, carcaça de bombas, válvulas e articulações de direção são exemplos importantes da utilização de ferro dúctil em componentes veiculares (Toktas et al., 2006). Apesar das propriedades dos ferros fundidos nodulares serem melhores em relação ao ferro fundido cinzento, estes apresentam comportamentos similares durante a usinagem, podendo ser usinados segundo as mesmas técnicas (Trent; Wright, 2000).

O ferro nodular austemperado (ADI) é um ferro fundido nodular tratado termicamente, que surgiu recentemente como um dos principais materiais de engenharia, devido as suas propriedades atrativas tais como, boa ductilidade, tenacidade e alta resistência mecânica, ao desgaste e a fadiga. Por estas propriedades únicas, o ADI, atualmente, vem sendo usado extensivamente em muitas aplicações estruturais na indústria automotiva, bélica, maquinários agrícolas entre outras (Lussoli, 2003). Goldberg et al. (2002) estimou a produção de ADI na América do Norte em 150.000 toneladas por ano, com uma projeção de crescimento para 2005 de 20%.

Comparado com o ferro fundido nodular, o ADI apresenta uma maior dificuldade de usinagem por se tratar de um material endurecido, e este grau de dureza é influenciado pela temperatura de austêmpera em que o material é submetido. Outro fator que reduz a usinabilidade do ADI é atribuído a austenita retida que pode se transformar em martensita durante a usinagem (Seah; Sharma, 1994). Devido a estes motivos têm-se intensificado pesquisas sobre a usinabilidade do ADI. Estudos desenvolvidos (Toktas et al., 2006; Erdogan et al., 2006; Da Silva et al., 2007) no intuito de entender melhor o comportamento do ADI estão relacionados com tempos e temperaturas de austêmpera. Nestes tratamentos podem-se encontrar diferentes níveis de austenitização, os quais alteram a matriz do ADI e conseqüentemente também contribuem para mudar a usinabilidade destes materiais (Lussoli, 2003). Este fato motivou a presente pesquisa.

1. 1 Objetivo do Trabalho

O objetivo deste trabalho é comparar a usinabilidade de três materiais: o ferro fundido nodular perlítico bruto-de-fundição (FE 70003), denominado de DI, e duas classes de ferro dúctil austemperado, ADI I (classe ISO 1.050-6) e o ADI II (classe ISO 800-10); em diferentes condições de corte e sistemas de lubrirefrigeração, no processo de furação através de um planejamento fatorial estatístico.

Esta comparação é baseada no monitoramento dos critérios de usinabilidade referentes à taxa de desgaste da ferramenta, força de avanço, torque, potência consumida de usinagem, vibração e qualidade dos furos produzidos, além de análises de microdureza e micrografias para avaliação de possíveis transformações martensíticas na frente de furação.

1.2 Estrutura do documento

A apresentação da dissertação está estruturada em seis capítulos. Além do capítulo I, Introdução, na sequência, no capítulo II será realizada uma revisão bibliográfica, que consiste no estado da arte, onde serão abordados os conhecimentos necessários à compreensão do trabalho, seguido pelo capítulo III, que detalhará todo o procedimento experimental utilizado para a execução da pesquisa. O capítulo IV apresentará os resultados e discussões referentes ao assunto abordado. No capítulo V constarão as principais conclusões e apresentará sugestões para trabalhos futuros. Finalmente, as referências bibliográficas utilizadas na pesquisa e na elaboração do texto estarão listadas no capítulo VI.

Capítulo II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ferros Fundidos

Ferro fundido é definido como sendo uma liga ternária de ferro-carbono-silício, com teores de carbono acima de 2,0%, em quantidade superior à que é retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar em carbono livre, na forma de veios ou lamelas de grafita. Esse grupo de ligas tem fundamental importância para a indústria, devido às características inerentes ao próprio material, mediante introdução de elementos de liga, aplicação de tratamentos térmicos adequados e pelo desenvolvimento do ferro fundido nodular, que viabilizou seu emprego em aplicações que eram exclusivas dos aços (Chiaverini, 2002).

Os ferros fundidos são classificados, de acordo com a composição química e microestrutura, mais especificamente quanto à existência e a forma da grafita, em ferros fundidos cinzentos, brancos, maleáveis, nodulares, mesclados e de grafita compactada. Chiaverini (2002) caracteriza cada tipo de ferro fundido da seguinte forma:

- Ferro Fundido Cinzento: apresenta estrutura com uma parcela relativamente grande de carbono no estado livre na forma de grafita lamelar e outra parcela na forma combinada de Fe_3C, possui boa usinabilidade relativamente aos demais ferros fundidos;
- Ferro Fundido Branco: sua estrutura apresenta o carbono quase inteiramente na forma de Fe_3C, devido às condições de fabricação e menor teor de silício, resultando em um material de elevada dureza, resistente, quebradiço e de difícil usinabilidade;
- Ferro Fundido Maleável: obtido a partir do ferro fundido branco recozido, resultando na transformação de praticamente todo Fe_3C em grafita na forma de nódulos, a estrutura apresenta certa ductilidade e tenacidade, mas boa usinabilidade;

- Ferro Fundido Nodular: sua estrutura consiste de carbono livre na forma de grafita esferoidal, que confere ao material boa ductilidade e boa usinabilidade, similar a do ferro fundido cinzento;
- Ferro Fundido Mesclado: caracterizado por uma mescla de proporções variáveis de ferro fundido branco e cinzento;
- Ferro Fundido de Grafita Compactada (Vermicular): a grafita apresenta-se em “escamas ou vermículos”, ou seja, em forma de plaquetas ou estrias, material intermediário entre o ferro fundido cinzento e nodular, possui a fundibilidade do ferro fundido cinzento, com melhor resistência mecânica e alguma ductilidade.

Na Figura 2.1 são mostradas as microestruturas das classes de ferros fundidos citados anteriormente.

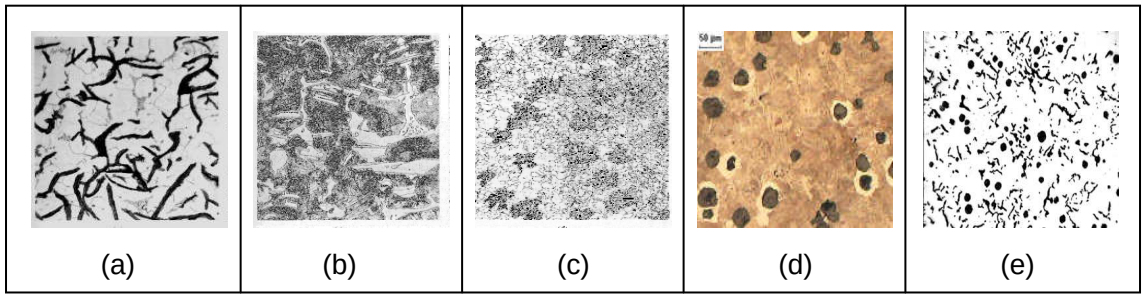

Figura 2.1 - Microestrutura das diversas classes de ferros fundidos: (a) ferro fundido cinzento, (b) ferro fundido branco, (c) ferro fundido maleável (Callister Jr, 2002); (d) ferro fundido nodular (Tupy S.A.); (e) ferro fundido de grafita compactada (vermicular) (Mocellin et al., 2004)

2.1.1 Ferro Fundido Nodular

O desenvolvimento do processo para a produção direta de grafita livre na forma de nódulos foi introduzido primeiramente por H. Morrogh da BCIRA em julho de 1946, usando cério como aditivo nodularizante, trabalhos subseqüentes conduzidos pela International Nickel Ltd. produziu resultados similares usando magnésio no lugar de cério (Angus, 1978; Labrecque; Gagné, 1998). Desde a introdução do ferro fundido nodular houve um crescimento contínuo na produção e nos campos de aplicação, principalmente para a indústria automotiva; e em 1995, o ferro fundido nodular correspondeu a 31% de todo ferro fundido beneficiado na Alemanha (Weingaertner et al., 1997).

2.1.1.1 *Processo de Obtenção*

O ferro fundido nodular apresenta composição química semelhante a do ferro fundido cinzento. A Tabela 2.1 apresenta a composição química básica do ferro fundido nodular.

Tabela 2.1 - Composição química dos ferros fundidos básicos para produção do ferro fundido nodular (Chiaverini, 2002)

Tipo	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Ni	%Cu	%Cr	%Mo	%Sn	Estrutura
1	4,0 máx.	1,7/2,8	0,25-0,5	0,10 máx	0,01 máx	1,0/3,0	1,5	0,3	0,3	0,10	**Perlítica**
2	4,0 máx.	1,6/2,8	0,30	0,10 máx	0,01 máx	0,5	0,15	0,1	0,01	0,02	**Ferrítico-Perlíltica**
3	4,0 máx.	2,5 máx	0,20	0,05 máx	0,01 máx	0,8	-	-	-	-	**Ferrítica**
4	4,0 máx.	2,1 máx	0,10 máx	0,03 máx	0,01 máx	-	-	-	-	-	**Ferrítica**

O ferro fundido nodular, também conhecido como ferro fundido dúctil, é obtido pela adição controlada de pequena quantidade de magnésio ou cério no ferro fundido de alto carbono em estado líquido, de modo a produzir a forma desejada de grafita e contrabalancear o efeito de elementos deletérios como o titânio, chumbo, bismuto e arsênico que interferem no processo de nodulização. A estrutura normal do ferro nodular no estado fundido bruto é constituída de uma matriz perlítica com grafita esferoidal, podendo apresentar ferrita ou cementita livre (Chiaverini, 2002).

Segundo Guesser e Hilário (1999), a obtenção de ferros fundidos nodulares de matriz perlítica pode se dar por diferentes processos, e que podem ser classificados como se segue:

- Bruto-de-fundição: a matriz na sua condição final é obtida na peça bruta-de-fundição;
- Recozimento: o material bruto-de-fundição é submetido a um recozimento subcrítico, com o intuito de diminuir a dureza. Ocorrem simultaneamente esferoidização da perlita e decomposição da perlita (em ferrita + grafita) em torno dos nódulos de grafita;
- Normalização: efetua-se austenitização plena seguida de resfriamento controlado, obtendo-se com este resfriamento a proporção desejada de perlita e ferrita;
- Normalização + recozimento: é realizada austenitização plena seguida de resfriamento em condições que resultem em matriz perlítica. Esta matriz é posteriormente condicionada num tratamento de recozimento subcrítico, ocorrendo decomposição parcial da perlita e esferoidização;

- Normalização de dentro da zona crítica: efetua-se austenitização no campo austenita/ferrita, seguindo-se o resfriamento. A percentagem de perlita é determinada pela quantidade de austenita formada, o que é função da temperatura de tratamento adotada.

2.1.1.2 *Características e Propriedades*

Os ferros fundidos nodulares são caracterizados pela dureza relativamente elevada com ductilidade moderada, alta resistência, além de boa usinabilidade. As melhores ductilidade e tenacidade desses materiais estão associadas à grafita na forma esferoidal que não interrompe a continuidade da matriz. A principal característica do ferro fundido nodular está relacionada especificamente ao limite de escoamento, que é maior comparado com o ferro fundido cinzento e mesmo aos aços-carbono comuns (Chiaverini, 2002). Os ferros fundidos nodulares são classificados, quanto às propriedades mecânicas, pela ABNT P-EB-585, segundo apresentado na Tab. 2.2. Fundidos de ferro fundido nodular perlítico são resistentes ao desgaste e ao impacto, tem condutividade térmica reduzida e baixa permeabilidade magnética e altas perdas por histerese (Néri; Carreño, 2003).

Tabela 2.2 - Classificação do ferro fundido nodular, segundo a ABNT P-EB-585 (Chiaverini, 2002)

Classe	**Limite de resistência à tração, min. Kgf/mm^2 (MPa)**	**Limite de escoamento (0,2%) min. Kgf/mm^2 (MPa)**	**Alongamento (5d),min (%)**	**Faixa de dureza aproximada Brinell**	**Estruturas predominantes**
FE 3817	38,0 (370)	24,0 (240)	17	140-180	Ferrítica
FE 4212	42,0 (410)	28,0 (270)	12	150-200	Ferrítica-Perlítica
FE 5007	50,0 (490)	35,0 (340)	7	170-240	Perlítica-Ferrítica
FE 6002	60,0 (590)	40,0 (390)	2	210-280	Perlítica
FE 7002	70,0 (690)	45,0 (440)	2	230-300	Perlítica
FE 3817 RI*	38,0 (370)	24,0 (240)	17	140-180	Ferrítica
* Classe com requisito de resistência ao choque.					

2.1.1.3 *Aplicações*

Desde que foi introduzido em 1948, o ferro fundido nodular encontrou numerosas aplicações através de todos os campos da indústria, e sua utilização está aumentando à medida que suas propriedades e possibilidades são mais completamente entendidas, influenciada por um grande número de desenvolvimentos técnicos (Angus, 1978; Labrecque;

Gagné, 1998). Devido a vantagens, dos ferros fundidos nodulares, de boa fundibilidade, capacidade de amortecimento e propriedades mecânicas (ductilidade, tenacidade e resistência) e usinabilidade apropriada, têm sido utilizados em muitas aplicações estruturais. Cames, virabrequins, carcaça de bombas, válvulas e articulações de direção são exemplos importantes da utilização de ferro dúctil em veículos (Toktas et al., 2006).

2.1.2 Ferros Fundidos Austemperados (ADI)

O ferro fundido nodular austemperado (ADI) teve seus primeiros experimentos publicados nos anos 60 pela International Harvester, no entanto, resultados de pesquisas adicionais só surgiram dez anos depois; com isso fundições norte-americanas, finlandesas e chinesas iniciaram produções em série de peças manufaturadas em ferro fundido nodular austemperado, em especial engrenagens anteriormente fabricadas em ferros fundidos temperados e revenidos (Keighley Laboratories Ltd, 2002). A partir dos Simpósios Internacionais ocorridos em 1984 e 1986, houve um aumento significativo na produção mundial do ferro fundido nodular austemperado (Do Carmo; Dias, 2001). Com a possibilidade de utilizar o ADI em substituição a aços forjados e cementados, pôde-se diminuir os custos de matérias-primas e etapas de fabricação como torneamento, fresamento, retífica de dentes de engrenagens e conseqüentemente uma economia de energia elétrica, mão-de-obra e insumos de produção, iniciando dessa forma uma onda de desenvolvimento e de pesquisas em escala mundial (Souza et al., 2006).

2.1.2.1 *Processo de Obtenção*

O ferro fundido nodular austemperado é obtido a partir do ferro fundido nodular através de tratamento térmico de austêmpera como apresentado na Fig. 2.2. Esse tratamento térmico consiste de três etapas mostradas a seguir (Sorelmetal, 2002):

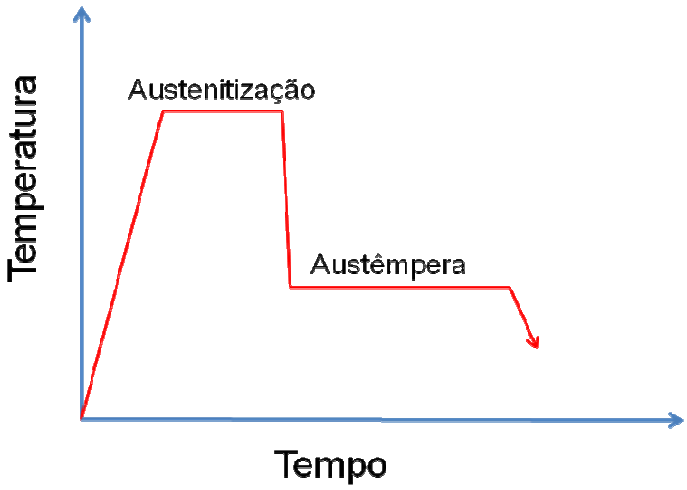

Figura 2.2 - Ciclo de tratamento térmico de austêmpera

- Primeira etapa: aquece-se o material até uma temperatura na faixa de 840 a 950ºC, na qual o mesmo deve ser mantido por tempo suficiente para produzir uma matriz totalmente austenítica e homogênea, saturada em carbono. Os nódulos de grafita representam um estoque de carbono e promovem a saturação de carbono através de um processo de difusão. Neste caso, o percurso da difusão será tanto menor quanto maior a quantidade de nódulos, caracterizada pela contagem de nódulos por unidade de área. A quantidade de carbono dissolvido na austenita é determinada pelo tempo e pela temperatura de austenitização.
- Segunda etapa: Após a austenitização, resfria-se rapidamente a peça inteira até a temperatura de austêmpera na faixa de 230 a 400ºC, ou seja, abaixo da temperatura de transformação da perlita e acima da temperatura de transformação da martensita. Podem ser utilizados como meios de resfriamento óleo quente, banho de sal, nevoeiro pulverizado, leito fluidizado ou ar ventilado;
- Terceira etapa: Manter isotermicamente na temperatura de transformação, conhecida como janela de processo mostrada na Fig. 2.3, para que seja produzida a quantidade de ausferrita (austenita de alto carbono e ferrita bainítica) desejada, ficando a austenita com um teor de carbono na faixa de 1,8 a 2,2%. Em seguida, resfriar a peça lentamente, ao ar, para evitar tensões internas (Alagarsamy, 1991; Carmo, 2001, citados por Lussoli, 2003). Dependendo do tempo de permanência na temperatura de austêmpera, a austenita remanescente poderá sofrer transformação martensítica durante o resfriamento ou se transformar em martensita por solicitação mecânica, devido ao teor de carbono presente ser relativamente baixo. A transformação martensítica só é evitada quando da estabilização da austenita, ou seja, quando da sua saturação por carbono. Para tal, o tempo de permanência na temperatura de austêmpera deve ser prolongado de forma que haja o enriquecimento de carbono na austenita como decorrência da continuada transformação ferrítica. O ideal para o ADI, em termos de obtenção de melhores propriedades, é que o tratamento isotérmico seja concluído no primeiro estágio (Lussoli, 2003).

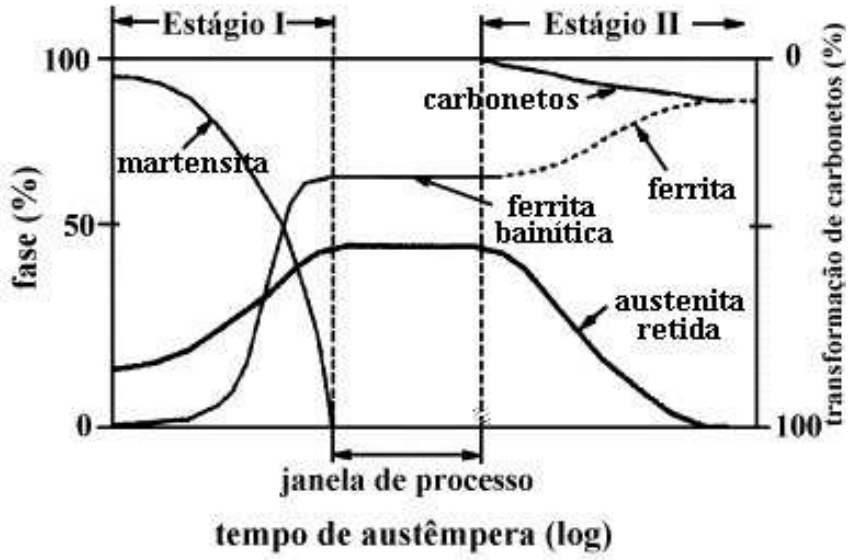

Figura 2.3 - Diagrama esquemático de transformação de fase durante a austêmpera Adaptado de Wu et al., 2002

2.1.2.2 *Características e Propriedades*

O ferro fundido nodular obtido por tratamento de austêmpera (ADI), possui uma combinação de propriedades que superam outras formas de estruturas de ferros fundidos. Características como alta ductilidade, tenacidade, resistência à tração, a abrasão e a fadiga, são de responsabilidade da quantidade de cada microestrutura formada após o tratamento isotérmico: ferrita acicular, austenita com alto teor de carbono (portanto, estável) e nódulos de grafita (Lussoli, 2003). Se comparado com ferro fundido nodular bruto de fundição, é duas vezes mais resistente à tração. Já comparado a alguns aços, possui resistência à fadiga igual ou superior, maior capacidade de amortecimento de vibrações, maior resistência ao alongamento, é 10% mais leve e mais fácil de usinar do que os aços com durezas equivalentes, sendo a grafita a responsável pelas propriedades físicas do material (Seker; Hasirci, 2006), além de ser um material 100 % reciclável (Klocke et al., 2007). O limite de escoamento do ADI é três vezes maior que o melhor alumínio fundido ou forjado. Adicionalmente seu peso é somente 2,4 vezes maior que o alumínio e para um componente típico, o custo por unidade de peso do ADI é 20% menor de que o aço e metade que do alumínio. Além disto, sua alta resistência e dureza têm promovido várias pesquisas relacionadas com a usinabilidade deste material (Cakir; Isik, 2008).

2.1.2.3 *Aplicações*

A aplicação do ferro fundido nodular austemperado destina-se a aplicações envolvendo impacto e desgaste como em suporte de mola de caminhão, componentes de transporte em mineração de carvão; ou em aplicações que necessitem de resistência à

fadiga e desgaste como no caso de engrenagens (Guesser; Guedes, 1997). Na indústria ferroviária, o ADI vem sendo utilizado em rodas para locomotivas e vagões, e acoplamentos de sapatas de freio; na agricultura, em equipamentos de terraplenagem e ferramentas para movimentação de terra como pontas de escavadeira, cilindros, correntes transportadoras, rodas dentadas; na indústria automotiva tem largo emprego na fabricação de peças localizadas principalmente na região do chassi e do sistema de suspensão, além de componentes de motores tais como virabrequins, válvulas, bielas (Tupy, 2009).

2.3 Usinabilidade dos Ferros Fundidos

Ferraresi (2003) define a usinabilidade de um metal como sendo uma grandeza tecnológica, que expressa, por meio de um índice comparativo, um conjunto de propriedades de usinagem do metal, em relação a outro tomado como padrão, ou seja, indica o grau de dificuldade de se usinar um material. A usinabilidade depende das propriedades mecânicas, dureza, composição química, operações anteriores realizadas sobre o material (a frio ou a quente) e do eventual grau de encruamento, mas é uma função das condições do processo empregado.

Os ferros fundidos são considerados materiais com boa usinabilidade, e a principal razão para a continuidade de seu uso em larga escala na engenharia não é somente pelo seu baixo custo e processo de fundição, mas também pela economia na usinagem. Pela maioria dos critérios analisados sua boa usinabilidade tem sido confirmada através das baixas taxas de desgaste das ferramentas, altas taxas de remoção de material, força de usinagem e potência de corte relativamente baixas, e de seus cavacos serem geralmente pequenos e fragmentados (Trent; Wright, 2000). Mas em alguns materiais deste grupo, encontramos dificuldades na usinagem, como no caso do ferro fundido branco que possui dureza de aproximadamente 550 HB. Por outro lado, o ferro fundido cinzento com dureza de aproximadamente 120 HB é de fácil usinabilidade. Já o nodular tem sua resistência mecânica, tenacidade e ductilidade aumentadas consideravelmente pela grafita em forma de nódulos, ou seja, quanto maior a dureza e a resistência mecânica de um tipo de ferro fundido pior é sua usinabilidade. Portanto a usinabilidade desse grupo de materiais vai depender muito de sua composição química e microestrutura.

2.3.1 Usinabilidade do Ferro Fundido Nodular

Quando se compara a usinabilidade do ferro fundido nodular com outros materiais, a microestrutura e propriedades mecânicas do material devem ser levadas em consideração. Através de vários tratamentos térmicos os ferros fundidos nodulares podem ser produzidos com diferentes matrizes: perlítica, perlítica-ferrítica ou ferrítica, e a usinagem é dificultada ou melhorada com o tipo da matriz, uma matriz perlítica apresenta uma pior usinabilidade devido a sua maior dureza. A tendência de a usinabilidade ser melhorada está geralmente associada com baixas propriedades mecânicas. Experiências mostram que um ferro fundido com matriz predominantemente perlítica tem aproximadamente a mesma usinabilidade do aço doce estirado a frio, mas no estado ferrítico recozido sua usinabilidade é menor, no entanto é tão boa quanto à do ferro fundido cinzento com dureza similar (Angus, 1978). O ferro fundido nodular possui melhores propriedades mecânicas que os ferros fundidos cinzentos, e recentemente tem substituído estes em muitas aplicações (Trent; Wright, 2000). Embora não se tenha uma informação definida publicada na literatura que o ferro fundido nodular tenha melhor usinabilidade que os aços, dados obtidos de indústrias como a General Motors mostram que partes fabricadas de ferro fundido nodular conduzem a um aumento, superior a 20%, na vida da ferramenta quando comparado a aços forjados tratados termicamente (Yigit et al., 2008).

2.3.2 Usinabilidade do Ferro Fundido Nodular Austemperado (ADI)

Os ferros fundidos nodulares austemperados exibem alta resistência e dureza juntamente com uma substancial ductilidade e tenacidade, mas em muitos casos apresentam baixa usinabilidade quando comparados com os aços com resistência equivalente e com o ferro fundido nodular. O ferro fundido nodular convencional possui dureza média em torno de 225 HB e os aços para forjamento tem dureza média em torno de 280 HB. O ADI, no entanto, apresenta uma dureza média em torno de 300 HB causando muita dificuldade na usinagem deste material (Seah; Sharma, 1994). Outra causa que tem sido investigada na adicional redução da usinabilidade do ADI está relacionada a fatores microestruturais, devido a presença de austenita retida instável, que sofre transformação martensítica pelo trabalho mecânico em que o material é submetido durante a usinagem.

A Figura 2.4 ilustra uma comparação da usinabilidade do ferro fundido austemperado com o ferro fundido nodular perlítico e com outros materiais ferrosos.

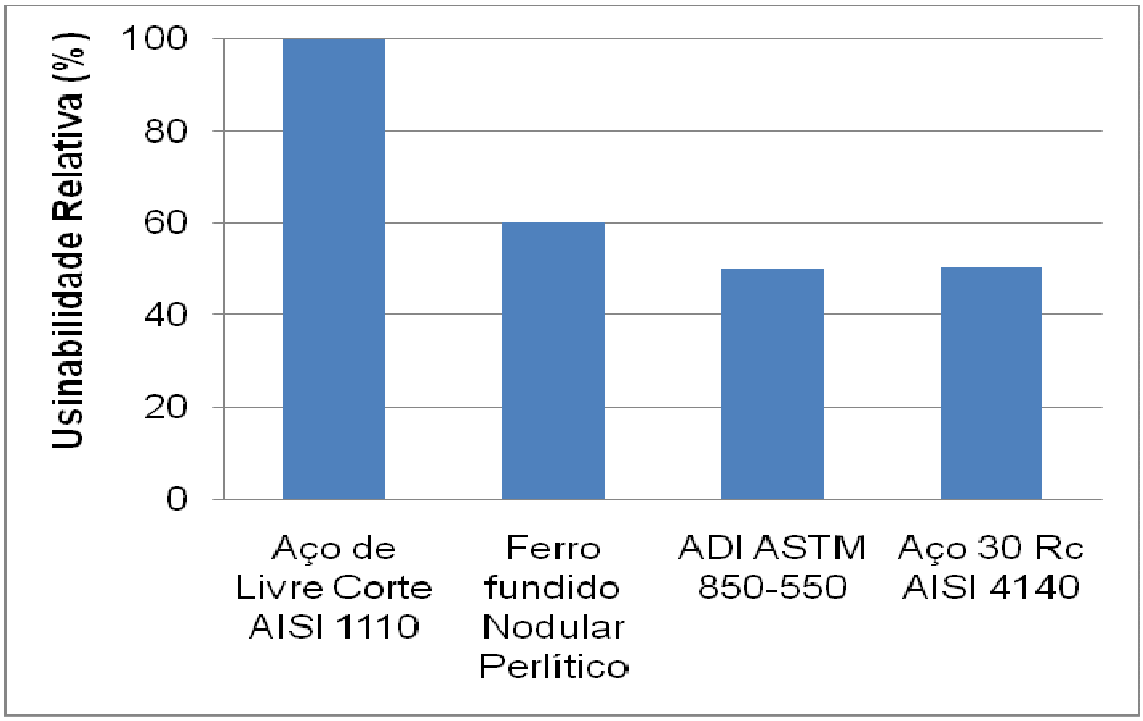

Figura 2.4 - Usinabilidade relativa de alguns materiais ferrosos (Adaptado de Cakir et. al., 2005)

2.3.3 Efeito da Microestrutura na Usinabilidade dos Ferros Fundidos Nodular e Austemperado

A usinabilidade é influenciada por vários fatores relacionados intimamente, que precisam ser analisados para a determinação do índice de usinabilidade.

Os ferros fundidos nodulares perlíticos apresentam microestrutura composta de perlita, carbonetos, sulfetos e fosfetos. A grafita e os microconstituintes influenciam a usinabilidade dos ferros fundidos nodulares de seguinte forma:

- Grafita: apresenta dureza relativamente baixa; promove a descontinuidade na matriz favorecendo a quebra do cavaco; atuam como lubrificante sólido, inibindo a aderência na interface cavaco-ferramenta, embora não exista evidencias claras que ela promova sua eliminação por completo. O efeito depende da quantidade, da distribuição e da morfologia, sendo que a quantidade é mais importante que a morfologia e distribuição. Quanto maior a quantidade, melhor usinabilidade.
- Perlita: quantidades crescentes reduzem a usinabilidade devido a presença de cementita na perlita. O tamanho dos grãos influencia a usinabilidade. Perlitas grossas, geralmente são mais usináveis que as perlitas finas.
- Carbonetos: apresentam elevada dureza, e quando presentes e distribuídos de forma dispersa na matriz reduzem a vida da ferramenta, mesmo em pequenas

quantidades. A vida da ferramenta cai drasticamente com o aumento da velocidade de corte. As forças de usinagem são elevadas.

- Sulfetos: Inclusões de sulfetos de Manganês aumentam a vida da ferramenta. Diminui a resistência ao cisalhamento e atua como lubrificante na interface cavaco-ferramenta;
- Fósforo: teores de 0,15% promovem o aparecimento do eutético fosforoso denominada de steadita. Ela está presente independentemente nos ferros fundidos cinzentos ou nodulares, ou associadas com os carbonetos no ferro fundido branco. Possui extrema dureza, com alta resistência à abrasão. A usinabilidade é reduzida, principalmente em teores de P acima de 2%. O aparecimento da steadita nos FoFo perlíticos promove a transformação de parte da perlita em ferrita, o que pode compensar o efeito na usinabilidade.

Além dos efeitos dos microconstituintes citados acima, a usinabilidade do ferro fundido nodular austemperado também sofre efeitos da:

- Bainita: apresenta estrutura acicular, produto da austêmpera conferindo ao material baixa usinabilidade;
- Martensita: produto da têmpera confere ao material alta dureza e resistência mecânica, e a usinabilidade dependerá da temperatura de revenimento.

O controle e a otimização das etapas de tratamento término têm efeito marcante sobre as propriedades peculiares do ADI. Qualquer alteração na temperatura e no tempo de austenitização ou de austêmpera será refletida diretamente na resistência a tração, ao escoamento e na dureza. Uma alta temperatura de austêmpera resulta em baixas durezas e resistência mecânica, mas melhora a ductilidade e a tenacidade. Já em baixas temperaturas ocorre o oposto, dureza e resistência ao desgaste mais elevadas, mas perdas na ductilidade e na tenacidade (Putatunda; Gadicherla, 1999). O tempo deve ser o suficiente para que ocorram as reações desejadas. São escassas as referências que estimam o tempo ideal para a produção do ADI, uma vez que são inúmeras as variáveis que afetam a etapa conhecida como janela de processo, tais como: composição química, números de nódulos, etapa de austenitização, extração de calor do banho isotérmico entre outros (Jacinto; Magalhães, 2003). A Figura 2.5 apresenta um esquema do efeito do tempo de austêmpera na quantidade de austenita estável e na dureza Brinell do ADI.

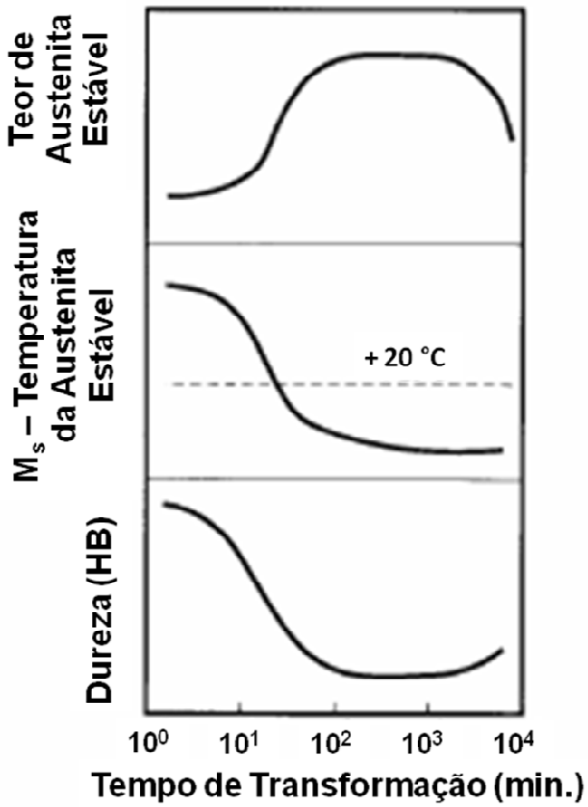

Figura 2.5 - Esquema relacionado à quantidade de austenita estável e dureza Brinell em função do tempo de transformação (Lussoli, 2003)

2.3.4 Tipos de Testes Empregados na Comparação da Usinabilidade

A usinabilidade é um fator muito importante para a indústria por exercer uma grande influência na produtividade. Geralmente, a usinabilidade pode ser medida em termos de números de peças produzidas por hora, custo de usinagem por peça ou qualidade da superfície acabada.

Inúmeros ensaios têm sido propostos por diferentes pesquisadores para julgar o comportamento do material, na combinação ferramenta-peça, em relação às grandezas de usinagem, desgaste da ferramenta, força de usinagem, acabamento da superfície, temperatura de corte, etc.(Ferraresi, 2003).

Seah e Sharma (1994) avaliaram a usinabilidade de ligas de ADI com níquel no torneamento com ferramenta de aço rápido, através do cálculo do índice de usinabilidade baseado na taxa de remoção de material e potência consumida em várias velocidades de corte e avanços, sendo mostrado que o índice de usinabilidade deste material aumenta significantemente com o aumento da temperatura de austêmpera devido à queda na dureza resultante;

Cakir et al.(2005) analisaram o desempenho de ADIs com diferentes estruturas e fizeram uma comparação da usinabilidade, através da força de corte, desgaste de flanco, rugosidade da superfície medidas por um critério de fim de vida comum, utilizando diversas ferramentas no processo de torneamento. Também avaliaram em seus experimentos os efeitos do tempo e temperatura de austêmpera sobre a usinabilidade dos ADIs. Foi verificado um aumento na austenita retida com a redução no tempo de austêmpera e que com o aumento da dureza há um aumento no desgaste da ferramenta de corte;

Néri e Carreño (2003) estudaram a usinabilidade do ferro nodular com matrizes diferentes no processo de furação, através do fim de vida da broca. Foi observada a quebra da broca nos materiais com maiores porcentagens de carbono, cobre e com o maior valor de dureza Vickers, e chegaram a conclusão que uma maior dureza e a presença de perlita fina ocasionam em uma pior usinabilidade.

Cakir e Isik (2008) investigaram a usinabilidade de ADIs com diferentes temperaturas e tempos de austêmpera utilizando como critério de usinabilidade a vida da ferramenta, a taxa de desgaste da ferramenta, forças de corte e acabamento da superfície produzida no processo de torneamento. Os materiais com menores tempos de austêmpera apresentaram melhor usinabilidade com relação a vida da ferramenta, forças de corte e qualidade da superfície. Na maior temperatura do tratamento térmico a dureza do material foi mais afetada, podendo ocasionar conflito entre a dureza e a vida da ferramenta, necessitando de uma melhor investigação para este caso.

2.4 Furação de Ferro fundido Austemperado e Nodular Perlítico

Na indústria de manufatura a grande maioria das peças apresenta pelo menos um furo, podendo ser estimado que de todos os processos convencionais, cerca de 25% em tempo de usinagem e 33% em número de operações estão relacionados com o processo de furação (Santos, 2002), tornando-o um dos mais importantes no setor de usinagem.

2.4.1 Características do Processo de Furação

O processo de furação tem como objetivo a obtenção de furos através do movimento relativo entre a peça e a ferramenta, denominada broca. A retirada de material é garantida pelo movimento relativo de avanço entre a peça e a broca segundo uma trajetória coincidente com o eixo longitudinal da ferramenta (Ferraresi, 2003). Este processo de usinagem é subdividido nas seguintes operações, segundo a norma DIN 8589 (Ferraresi, 2003):

- Furação em cheio: destinado à obtenção de furos cilíndricos, onde todo o material contido no volume do furo é retirado na forma de cavaco;
- Escareamento ou furação com pré-furo: objetiva a obtenção de furos cilíndricos em uma peça previamente furada;
- Furação escalonada: geração de furos com dois diâmetros distintos;
- Furação de centros: obtenção de furos de centro com o objetivo de facilitar a fixação da peça para operações posteriores;
- Trepanação: apenas o material contido no volume do furo localizado próximo à circunferência que delimita o furo é removido e após a operação o núcleo do furo permanece maciço.

A Figura 2.6 apresenta esquematicamente as variações deste processo de usinagem.

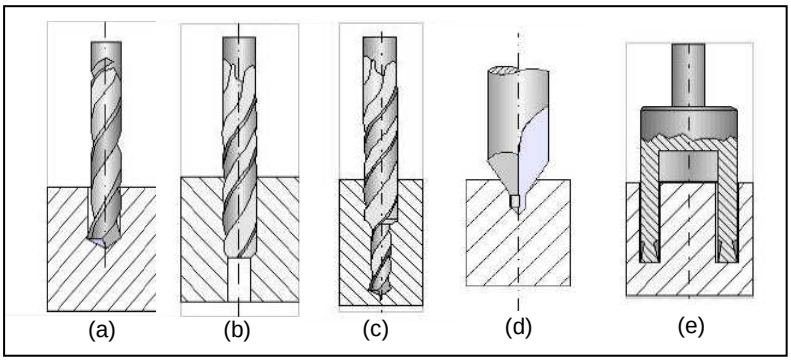

Figura 2.6 - Esquema das variantes do processo de furação: (a) furação em cheio, (b) escareamento ou furação com pré-furo, (c) furação escalonada, (d) furação de centros e (e) trepanação, adaptado de Ferraresi, 2003

A furação possui várias características que são, na verdade, complicadoras do processo, dentre elas estão:

- O processo de produção do cavaco é interno e existe um espaço limitado nos canais para a sua remoção, dificultando o transporte dos mesmos para fora de região de corte;
- A velocidade de corte não é uniforme, variando desde zero, no centro do furo, até um máximo na periferia;
- A lubrificação/refrigeração da região de corte é comprometida e o fluido de corte chega com dificuldade (ou não chega) à parte de trabalho da ferramenta;
- A distribuição de calor na região de corte é inadequada;
- Ocorrem atrito e desgaste pronunciado nas quinas com cantos vivos das brocas.

Os ferros fundidos nodulares são caracterizados por apresentarem cavacos longos e segmentados, e a quebra destes não ocorre tão facilmente (Trent; Wright, 2000). Durante a furação, principalmente na usinagem de furos profundos, pode ocorrer risco de entupimento do furo, pela dificuldade de evacuação destes cavacos, aumentando o momento torsor necessário e a consequente probabilidade de quebra da ferramenta (Diniz, et al., 2002). Além dos problemas normais de furação já citados, a furação do ferro fundido austemperado é ainda mais dificultada pela transformação da austenita retida em martensita, aumentando a dureza do material nas proximidades da região de formação do cavaco, fazendo com que a força de avanço necessária seja aumentada.

Além das características inerentes ao material, as condições de corte empregadas também podem dificultar a furação dos ferros fundidos nodulares perlíticos e austemperados. Como a velocidade de corte diminui da periferia para o centro da broca, no caso de furação sem pré-furo serão formadas arestas postiças de corte (APCs) na vizinhança do centro da ferramenta. O aumento da velocidade de corte para minimizar a formação desta APC gera maiores desgastes na ferramenta, na vizinhança da periferia da broca (Diniz et. al., 2002).

2.4.2 Qualidade dos Furos Usinados

Os erros geométricos e dimensionais, a presença de rebarbas e a textura da superfície definem usualmente a qualidade do processo de furação. A precisão resultante dos furos depende do tipo de processo de furação, da peça, da ferramenta (grau de afiação e geometria da ponta da broca), da máquina-ferramenta, das condições de corte e rigidez do sistema máquina-ferramenta-peça (Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 1983).

De acordo com Diniz et. al.(2002) o processo de furação enfrenta dificuldades em termos de precisão, apresentando tolerância dimensional das superfícies furadas da ordem de IT 11, embora trabalhos realizados por Santos (2002), mostraram que na usinagem de ferro fundido cinzento utilizando brocas de metal duro conseguiu-se qualidade IT 8 e além disso furos gerados com ferramentas de aço rápido foi possível a obtenção de qualidade IT 7 que é considerada excelente do ponto de vista do processo de furação . Em termos de tolerância geométrica existe risco de excentricidade quando a relação comprimento/diâmetro (L/D) é maior que 3. Portanto, quando são exigidos furos de precisão, após a operação de furação o furo passa por operações de acabamento, tais como alargamento, brochamento, mandrilamento, torneamento interno, retificação interna, etc, além da necessidade de abertura de furo de centro previamente ao processo de furação para que a broca não realize um furo excêntrico a partir do inicio do furo (Diniz et al., 2002).

A avaliação da qualidade da superfície de uma peça usinada geralmente é realizada através do monitoramento das dimensões e rugosidade, e então comparadas com as tolerâncias especificadas no projeto (Machado et. al., 2009).

Os parâmetros de rugosidade são normalmente classificados em três grupos de acordo com sua funcionalidade (Gadelmawla et. al., 2002), definidos como:

- Parâmetros de amplitude, usados para monitoramento das características verticais dos desvios da superfície, determinados apenas pelas alturas dos picos e/ou profundidade dos vales, sem considerar o espaçamento ao longo da superfície;
- Parâmetros de espaçamento são aqueles que tratam das características horizontais da superfície, determinados pelo espaçamento dos desvios do perfil ao longo da peça;
- Parâmetros híbridos combinam os parâmetros de amplitude e espaçamento, qualquer mudança em um dos dois pode ter efeitos sobre as propriedades híbridas.

Dentre estes parâmetros, o mais importante e mais utilizado em superfícies usinadas são os de amplitude. As características verticais do perfil são comumente descritas por parâmetros tais como a rugosidade média (Ra), que representa o desvio médio das alturas a partir de uma linha média da topografia, podendo ser utilizado como um parâmetro de controle do processo, de forma que se houver alteração em Ra pode significar que o processo também sofreu alguma mudança, podendo estar relacionada com um possível desgaste excessivo da ferramenta, ou mesmo alguma inclusão ou alteração da camada superficial da superfície devido por, exemplo, a algum nível de encruamento (Machado et. al., 2009).

Problemas associados com efeitos de média podem ser retificados pela aplicação de um parâmetro RMS, uma vez que, devido a esta ponderação pelo quadrado das alturas, a rugosidade r.m.s (Rq) se torna mais sensível que Ra para os desvios da linha média (Stachoviak; Batchelor, 2005).

Entretanto em alguns casos, é necessário especificar a distância entre picos e vales da topografia, então um parâmetro, muito sensível, que relaciona a distância máxima vertical entre o pico mais elevado e o vale mais profundo no comprimento de amostragem, especificado como Rt, também é muito utilizado na usinagem (Gadelmawla et. al., 2002).

É conhecido que vários são os fatores que influenciam a qualidade de uma superfície usinada, dentre estes os mais importantes são as condições de corte, processo empregado, geometria e nível de desgaste da ferramenta de corte, bem como o tipo de material da peça e suas característica tais como dureza e microestrutura. E é cada vez mais importante que a peça acabada já saia do processo de usinagem com uma qualidade requerida a fim de

evitar processos adicionais de acabamento, reduzindo dessa forma custos e tempos para a obtenção do produto final.

Ferraresi (2003) estipula que a faixa do valor da rugosidade média (R_a) para o processo de furação está compreendida entre 1,60 e 6,35 µm, podendo em certos casos exceder estes valores, devido às muitas variáveis do processo, sendo difícil prever claramente o acabamento da superfície dos furos.

2.4.3 Formação de Rebarbas

As rebarbas são materiais de presença indesejáveis na maioria dos processos de usinagem. O processo de furação forma rebarbas na entrada e no final do furo. A rebarba na entrada é formada por escoamento plástico do material e a da saída, pela conformação do material devido às elevadas taxas de compressão no centro do furo (Costa, 2004).

As propriedades do material da peça são mencionadas como importantes fatores na formação de rebarbas. Materiais de alta ductilidade e baixo limite de escoamento, tais como os ferros fundidos nodulares os quais possuem características próximas das dos aços, tendem a ser mais susceptíveis à formação de rebarbas.

A formação da rebarba na furação ocorre à medida que a deformação acumulada no fundo do furo também aumenta, e quando este valor é suficiente para atingir a tensão de ruptura do material. A fratura é iniciada no ponto de maior deformação e o avanço da broca (antes da fratura) depende da ductilidade do material. A fratura também depende da geometria da ferramenta, pois brocas com grande aresta transversal tendem a aumentar a força axial no centro do furo (Costa, 2004).

As rebarbas podem ser divididas em três tipos como descrito abaixo e mostradas na Fig. 2.7 (Min et. al., 2001):

- **Uniforme**: pequenas dimensões e altura uniforme ao redor de toda periferia do furo. Geralmente é formada uma tampa (*cap*), que pode se desprender da peça durante o processo ou pode ser removida facilmente após a execução do furo. O processo de formação geralmente ocorre por meio de uma primeira fratura no centro do furo, no qual altas taxas de tensão de compressão atuam no material, em virtude da aresta transversal de corte. Uma tampa secundária (chapéu cônico), definida como cavaco rebarba, adere-se à tampa principal. Com o avanço da broca, a zona de deformação plástica se expande do centro do furo para as arestas principais da broca e uma segunda fratura ocorre na periferia do furo;
- **Coroa**: possui grande altura e superfície irregular na periferia do furo. Com o aumento do avanço, a força axial de furação aumenta, assim como a deformação plástica no centro do furo, principalmente com brocas de afiação cônica com grande

aresta transversal. Então, a fratura ocorre no centro do furo e a rebarba forma-se com a deformação do material restante nas periferias;

- **Transição**: esse mecanismo de formação de rebarba se situa entre a uniforme e a coroa. As fraturas ocorrem quase simultaneamente no centro do furo e na periferia. Portanto as rebarbas que se formam primeiro são do tipo coroa e, depois, do tipo uniforme.

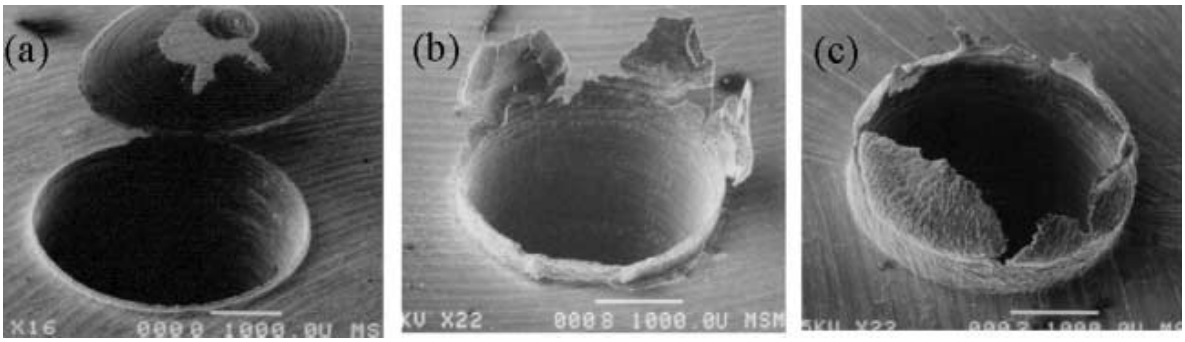

Figura 2.7- Tipos de rebarbas. a) uniforme; b) transição; c) coroa, (Min et al., 2001)

Em materiais frágeis, como é o caso dos ferros fundidos cinzentos pode ocorrer a formação de rebarba devido a uma pequena deformação, suficiente para atingir o valor crítico e causar uma fratura no plano de cisalhamento negativo, de modo que a borda da peça irá conter uma superfície fraturada e esta região recebe a denominação de “breakout”, ou rebarba negativa (Da Silva, 2004).

As condições de corte podem ser controladas de modo a minimizar o tamanho da rebarba. Qualquer fator que reduza a força de corte reduzirá também o tamanho da rebarba. Considerando que a força de corte decresce quando a velocidade de corte aumenta, o aumento da velocidade reduzirá o tamanho da rebarba, porém como a redução da força não é tão significativa, o aumento da velocidade não afetará apreciavelmente a altura ou espessura da rebarba. Entretanto, quando a velocidade de corte ultrapassa determinado valor, ocorre um aumento na capacidade de deformação do material da peça contribuindo para o aumento da rebarba, anulando praticamente o efeito da redução da mesma ocasionada pelo decréscimo da força de corte verificado inicialmente. Sendo o avanço considerado como um fator importante na formação da rebarba, para grandes avanços serão produzidas grandes rebarbas.

2.5 Ferramentas Empregadas na Usinagem de Ferro Fundido Austemperado e Nodular Perlitico

No processo de furação dos ferros fundidos geralmente são empregadas ferramentas de aço rápido e metal duro.

2.5.1. Aço Rápido

Os aços rápidos são ferramentas de alta liga de tungstênio, molibidênio, cromo, vanádio, cobalto e nióbio. Eles são materiais tenazes, de elevadas dureza a quente e resistência ao desgaste, e sua estrutura no estado temperado é composta de carbonetos complexos em matriz martensítica (Diniz et al., 2002).

Existe no mercado um variado grupo de aços rápidos, classificados segundo a AISI e SAE em dois grupos: os predominantemente ao tungstênio designados pela letra “T” e os ao molibidênio indicados com a letra “M”. Estas categorias ainda são subdivididas em dois subgrupos ambas contendo cobalto: os tipos W-Co e Mo-Co. Os aços rápidos ainda contêm em sua composição cromo e vanádio. A Tabela 2.3 mostra a classificação, a composição e as características dos aços rápidos.

Tabela 2.3 - Composição e Características dos Aços Rápidos (Chiaverini, 2002)

Tipo de aço	Classificação SAE	%C	%Mn	%Si	%Cr	%V	%W	%Mo	%Co	Tenacidade	Resistência ao desgaste	Dureza a quente
ao W	T1	0,7	0,3	0,25	4	1	18	-	-	Baixa	Muito Boa	Muito Boa
	T2	0,85	0,3	0,25	4	2	18	-	-			
	T3	1	0,3	0,25	4	3	18	-	-			
	T7	0,8	0,3	0,25	4	2	14	-	-			
	T9	1,2	0,3	0,25	4	4	18	-	-			
ao W-Co	T4	0,75	0,3	0,25	4	1	18	-	5	Baixa	Muito Boa	Excelente
	T5	0,8	0,3	0,25	4	2	18	-	8			
	T6	0,8	0,3	0,25	4	1,5	20	-	12			
	T8	0,8	0,3	0,25	4	2	14	-	5			
ao Mo	M1	0,8	0,3	0,25	4	1	1,5	8	-	Baixa	Muito Boa	Muito Boa
	M2	0,85	0,3	0,25	4	2	6	5	-			
	M3	1	0,3	0,25	4	2,75	6	5	-			
	M4	1,3	0,3	0,25	4	4	5,5	4,5	-			
	M10	0,85	0,3	0,25	4	2	-	8	-			
ao Mo-Co	M6	0,8	0,3	0,25	4	1,5	4	5	13	Baixa	Muito Boa	Excelente
	M30	0,85	0,3	0,2	4	1,25	2	8	5			
	M34	0,85	0,3	0,25	4	2	2	8	8			
	M35	0,85	0,3	0,25	4	2	6	5	5			
	M36	0,85	0,3	0,25	4	2	6	5	8			

A seguir estão relacionados os principais elementos de liga dos aços rápidos com seus respectivos efeitos no material:

- **Carbono**: seus teores variam de 0,7 a 1,6% e atuam no sentido de aumentar a dureza e temperabilidade do material. O aumento no teor de carbono aumenta a formação de carbonetos complexos conferindo ao aço rápido maior dureza e resistência ao desgaste. Pela Tab. 2.3 os aços rápidos são considerados como materiais de alto teor de carbono;
- **Tungstênio e Molibidênio**: Ambos são formadores de carbonetos, responsáveis pela elevada resistência ao desgaste do aço rápido. O tungstênio sempre está presente nestes materiais em teores que podem chegar a 20%. O molibidênio é introduzido como substituto do tungstênio, mas pelo fato de apresentar peso atômico de aproximadamente metade do tungstênio, a mesma porcentagem em peso produz o dobro de átomos para ligar-se ao carbono do aço. Entretanto, devido ao menor ponto de fusão, os aços ao Mo são temperados em temperaturas inferiores aos do tipo ao W;
- **Vanádio e Nióbio**: São desoxidantes, mas fortes formadores de carbonetos. O carboneto de vanádio é o mais duro encontrado nos aços rápidos. Os aços com alto teor de carbono e vanádio são os que possuem melhor resistência ao desgaste. Este tem sido substituído pelo nióbio, já que possui características semelhantes e, no Brasil, é mais barato (Diniz et.al, 2002);
- **Cromo**: juntamente com o carbono, é o principal responsável pela alta temperabilidade dos aços rápidos e também diminui a oxidação do aço durante o tratamento térmico;
- **Cobalto**: aumenta a dureza a quente elevando, em conseqüência, a eficiência das ferramentas em operações a altas temperaturas. O cobalto se dissolve grandemente na matriz, proporcionando, uma dureza média mais elevada. O ponto de fusão da liga é aumentado fazendo com que haja uma queda na taxa de difusão dos elementos de liga inibindo a coalescência de carbonetos secundários, permitindo assim temperaturas de tempera mais elevadas sem risco de problemas de crescimento de grão, resultando, portanto, no aumento da dureza a quente do aço (Machado et al., 2009). Devido a essa característica, os aços rápidos ao cobalto são recomendados para cortes em desbaste pesado e para a usinagem de materiais que apresentam cavacos curtos como o ferro fundido, em que a temperatura se eleva bastante devido não utilização de fluido de corte.

As aplicações dos aços rápidos são principalmente em ferramentas tais como brocas, fresas cossinetes, brochas, matrizes e até ferramentas de barra para aplicações em torneamento de peças de diâmetros reduzidos, cuja velocidade de corte conseguida é inferior à velocidade econômica de corte dos materiais de ferramentas mais resistentes (Machado et al., 2009).

Os aços rápidos também podem ser encontrados com revestimentos, os quais garantem a ferramenta características tenazes no núcleo e duras, resistentes ao desgaste e quimicamente inertes na superfície. A camada de revestimento reduz os esforços durante o corte, devido ao seu baixo coeficiente de atrito, apresenta taxa de desgaste menor, dada pela alta dureza juntamente com o baixo atrito da cobertura, existe ainda uma menor tendência à formação da aresta postiça de corte pela redução do caldeamento a frio promovida pelo revestimento. Por estes motivos as ferramentas revestidas apresentam maiores vidas e podem trabalhar em velocidades superiores que as ferramentas sem revestimento (Diniz et. al, 2002) Os tipos de revestimento mais utilizados nestas ferramentas são o nitreto de titânio (TiN), o carbonitreto de titânio (TiCN) e o TiAlN (nitreto de titânio e alumínio), que são depositados sobre o substrato da ferramenta pelo processo de PVD (deposição física a vapor), que é realizado em temperaturas da ordem de 500℃, as quais não prejudicam o tratamento térmico realizado previamente nos aços rápidos. Novos recobrimentos estão aparecendo no mercado, com bons resultados nos ferrosos, dentre eles o AlCrN (Alcrona®+), AlCrN (Helica®) e TiAlN (Futura®) desenvolvidos recentemente (Oerlikon-Balzers, 2009).

2.5.2 Metal Duro

O metal duro é o tipo de material de ferramenta mais empregado na usinagem. É uma liga de carboneto de tungstênio produzido pela metalurgia do pó através da prensagem e sinterização de uma mistura de pós de carbonetos e aglomerantes, que pode ser cobalto, ferro ou níquel ou ainda uma combinação deles, formando um corpo de alta dureza e resistência à compressão.

Inicialmente o metal duro constituía-se apenas de carboneto de tungstênio (WC) e cobalto (Co), mostrando-se adequadas para a usinagem de ferros fundidos, porém para a usinagem de aços apresentavam baixa resistência a craterização, devido a fenômenos de difusão e dissolução ocorridos na interface cavaco-ferramenta. A introdução de carboneto de titânio (TiC), carboneto de tântalo (TaC) e/ou carboneto de nióbio NbC aos WC+Co reduziu os problemas de craterização das ferramentas na usinagem dos aços, por estes carbonetos apresentarem maiores resistência ao desgaste, terem maiores durezas, solubilidade no ferro bem menor e serem mais estáveis quando comparados com o WC.

Os metais duros são classificados segundo a norma ISO (ISO 513:2004 E): nas seguintes classes

- **Classe K:** designada pela cor vermelha, sua composição é dada apenas por WC mais Co. É conhecida por ser a classe dos ferros fundidos ou dos cavacos curtos;
- **Classe P:** sua cor de referência é azul, em sua composição básica são adicionados TiC, TaC e/ou NbC em uma quantidade de até 30%. Esta é a classe recomendada para a usinagem dos aços ou dos cavacos longos;
- **Classe M:** esta é uma classe intermediária, pois possui adições de TiC, TaC e/ou NbC, mas em menores quantidades que aquelas apresentadas pela classe P, cerca de 2 a 3%. Sua aplicação é recomendada para os aços inoxidáveis, principalmente os austeníticos. Apresenta coloração padrão amarela.
- **Classe N:** cor padrão verde, aplicável, em geral, a materiais não ferrosos tais como alumínio, cobre, bronze e latão;
- **Classe S:** cor padrão marrom, recomendável para a usinagem de superligas e ligas de titânio;
- **Classe H:** coloração cinza, aplicável à usinagem de materiais endurecidos (aços endurecidos).

A letra de designação da classe é sempre acompanhada por um número que representa a tenacidade e a resistência ao desgaste da ferramenta. Quanto maior o número, maior a tenacidade e menor a resistência ao desgaste. Esta subclassificação dos metais duros depende principalmente da composição química da ferramenta, incluindo qualidade e quantidade de carbonetos e do tamanho de grão dos carbonetos, ou seja, quanto mais finos os carbonetos, maior a tenacidade, aliada a uma maior dureza média.

Quanto ao revestimento, ao contrário das ferramentas de aço rápido, além do recobrimento pelo processo de PVD, os metais duros também podem ser revestidos por CVD (deposição química a vapor) que é realizado a temperaturas da ordem de 1000℃. Uma das diferenças entre estes dois processos é que o primeiro garante a mesma tenacidade do substrato, enquanto que o segundo reduz esta propriedade, implicando em problemas da aplicação de ferramentas submetidas a um revestimento por CVD em cortes interrompidos.

O revestimento de ferramentas de metal duro pode ser de uma única camada de TiC, ou, mais comum, triplo revestimento de TiC, TiCN e TiN e TiC, óxido de alumínio (Al_2O_3) e TiN. Normalmente, o TiC ou o TiCN são revestimentos muito utilizados como primeira camada por garantirem uma boa coesão com o substrato, além de garantirem alta

resistência ao desgaste. O Al_2O_3 apresenta as vantagens de ser inerte quimicamente e resistente ao desgaste devido a sua dureza, além de reduzir a condutividade térmica com o aumento da temperatura, mas por outro lado tem a desvantagem de apresentar pequena resistência a choques térmicos e mecânicos. Por último, o TiN é responsável por reduzir o coeficiente de atrito na interface cavaco-ferramenta, sendo também quimicamente mais estável que o TiC.

Outro revestimento que vem sendo muito utilizado é o TiAlN que é um nitreto a base de Ti e Al. Esta cobertura tem se mostrado excelente para a usinagem de ferro fundidos, tanto em insertos intercambiáveis como em brocas de metal duro integral. O TiAlN apresenta maior resistência à oxidação permitindo a utilização em temperaturas mais altas, baixa condutividade térmica protegendo, dessa forma, a aresta de corte e aumenta a remoção de calor através do cavaco, alta dureza a frio e a quente e alta estabilidade química. Os novos revestimentos PVD a base de Cr e Al (AlCrN) também estão sendo fortemente utilizados para revestir metal duro (Oerlikon Balzers, 2009)

2.5.3 Geometria da Ferramenta

As ferramentas utilizadas no processo de furação, como dito anteriormente, são as brocas, as quais podem possuir de 2 até 4 arestas de corte e sulcos helicoidais por onde escorre o cavaco. O ângulo da ponta varia de 90º a 150º de acordo com a dureza do material a furar, sendo os ângulos de 118º e 120º os mais comuns de se encontrar. Os tipos de brocas mais comuns são: broca helicoidal, broca de centro, broca com pastilhas intercambiáveis, canhão e broca múltipla. A Figura 2.8 mostra estes tipos de brocas.

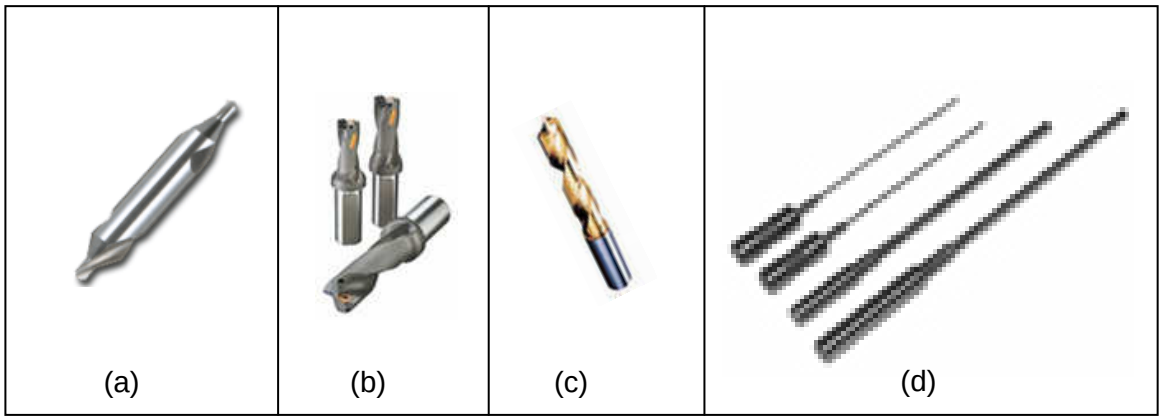

Figura 2.8 - Tipos de Brocas: (a) broca centro, (b) brocas intercambiáveis, (c) broca helicoidal e (d) brocas canhão

Apesar da variedade de tipos de brocas disponíveis no mercado, a broca helicoidal é a mais utilizada e a mais importante no processo de furação. A geometria padrão e as

partes de uma broca helicoidal são apresentadas na Fig. 2.9, segundo a norma ABNT NBR 6176 (Diniz et al., 2002), para brocas com haste cilíndrica.

As partes principais de uma broca helicoidal são definidas da seguinte maneira, segundo Diniz et. al.(2002):

- **Haste**: destina-se à fixação da broca na máquina. Em brocas de diâmetro pequeno (até 15 mm), em geral usa-se brocas de haste cilíndrica e a fixação à máquina se dá por intermédio de pinças e mandris. Em brocas de diâmetros maiores, prefere-se prender a broca a um cone morse, que por sua vez é preso à máquina, o que possibilita maior força de fixação;
- **Diâmetro (D)**: é medido entre as duas guias da broca e, normalmente, tem tolerância h8;
- **Núcleo**: parte inferior da broca de diâmetro igual a 0,16 D. Confere rigidez à broca;
- **Guias**: a superfície externa da broca helicoidal apresenta duas regiões (uma em cada aresta de corte) que têm diâmetro maior que o diâmetro das paredes da broca. Tais regiões são denominadas de guias. Elas têm duas funções básicas: guiar a broca dentro do furo e evitar que toda a parede externa da ferramenta atrite com as paredes do furo, reduzindo assim os esforços necessários para a furação;
- **Canais helicoidais**: são as superfícies de saída da ferramenta. O ângulo da helicóide dos canais da broca é chamado de ângulo de hélice (δ), o qual auxilia no desprendimento do cavaco. Deve ser determinado de acordo com o material a ser usinado. Quanto mais duro o material, menor deve ser o δ. O ângulo de hélice de ferramentas normais, que na periferia da broca coincide com o ângulo de saída, pode ser de 28° para brocas de aplicação geral (brocas do tipo N com ângulo de ponta (σ) igual a 118°), 15° para brocas destinadas à usinagem de materiais com cavacos curtos (brocas tipo H com ângulo de ponta (σ) igual a 60° ou 90°) e 40° para ferramentas destin adas a usinagem de materiais com cavacos longos e/ou materiais moles (brocas tipo W com ângulo de ponta (σ) aproximadamente 140°). O comprimento do canal da hélice também pode variar dependendo do diâmetro da broca e do comprimento do furo que se deseja usinar.
- **Arestas de corte:** em uma broca helicoidal as duas arestas principais de corte não se encontram em um ponto, mas existe uma terceira aresta ligando-as. Esta terceira aresta é chamada de aresta transversal de corte. O ângulo

formado entre as duas arestas principais, chamado de ângulo de ponta, é normalmente igual a 118°, mas para brocas destinadas à usinagem de materiais moles, seu valor é superior, chegando a 140°.

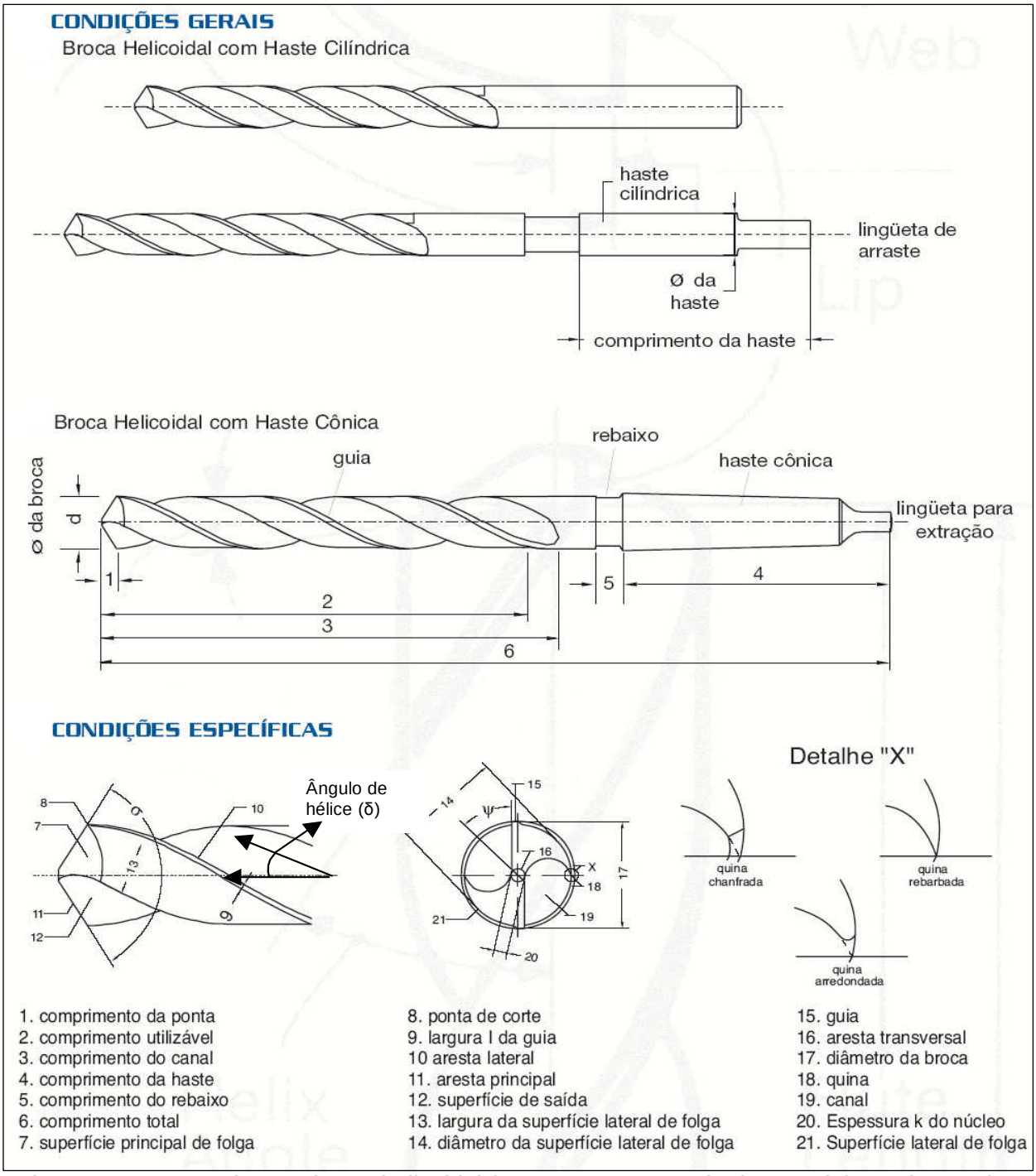

Figura 2.9 - Partes de uma broca helicoidal (ABNT NBR 6176, citado por Diniz et al., 2002)

Além dos ângulos descritos acima, existe mais um importante a ser discutido, o ângulo de incidência ou de folga (α), variando entre 6º e 15º, que tem a função de reduzir o

atrito entre a broca e a peça e facilitar sua penetração no material. Este ângulo também deve ser determinado de acordo com o material da peça a ser furada. Quanto mais duro o material menor deve ser o ângulo de incidência.

Quando uma broca comum não proporciona um rendimento satisfatório em um trabalho específico e a quantidade de furos não justifica a compra de uma broca especial, pode-se fazer algumas modificações nas brocas tipo N e obter resultados melhores. Pode-se modificar o ângulo da ponta, tornando-o mais obtuso e melhorando os resultados na furação de materiais duros, como aços de alto carbono.

Para a usinagem de ferro fundido recomenda-se utilizar uma broca com ângulo normal de 118º com a parte externa das arestas de corte (cerca de 1/3 do comprimento) afiadas com cerca de 90º.

2.6 Desgaste nas Ferramentas de Corte

Segundo Machado et al. (2009) estudar e entender os processos de destruição das ferramentas de corte é importante, pois podem permitir ações coerentes e efetivas para reduzir a taxa desta destruição, prolongando a vida da aresta de corte das ferramentas.

Podem-se distinguir três tipos de destruição da ferramenta de corte na usinagem: avaria, desgaste e deformação plástica. Os três promovem a mudança na geometria da ferramenta de corte. Os dois primeiros promovem a perda de massa, enquanto o último promove o deslocamento de massa na ferramenta de corte.

2.6.1 Mecanismos de Desgaste

As formas de desgaste se desenvolvem por vários mecanismos de desgaste, isto é, abrasão, adesão, difusão e oxidação que se predominam em função da temperatura de corte, que é influenciada principalmente pela velocidade de corte. De acordo com a Fig. 2.10, pode-se observar que a baixas temperaturas apenas os mecanismos de adesão e abrasão estão presentes e a adesão é predominante, enquanto que em temperaturas elevadas, a adesão perde lugar para novos mecanismos de difusão e oxidação em escala exponencial (Machado et al., 2009).

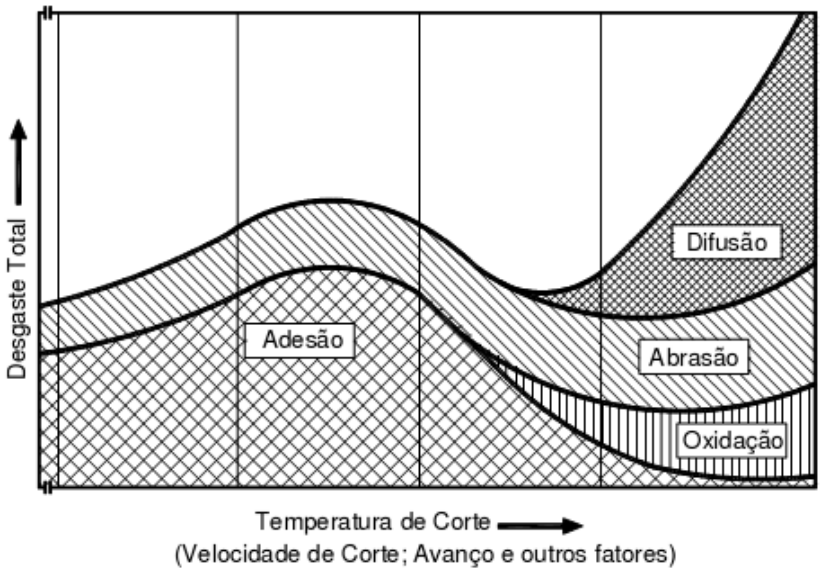

Figura 2.10 - Diagrama de distribuição dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte (Vierege,1970, citado por König e Klocke, 1997)

Além destes quatro mecanismos, Trent e Wright (2000), ainda consideram as deformações plásticas superficiais por cisalhamento a altas temperaturas e sob tensão de compressão. O mecanismo de adesão é chamado por estes autores de *attrition.* Zhang et al. (2001) mapearam os mecanismos de desgaste de flanco em brocas de aço-rápido na usinagem da liga de alumínio-silício AlSi9Cu3 para variadas velocidades de avanço e rotações. A Figura 2.11 apresenta o gráfico com os resultados obtidos, o qual mostrou que para baixos valores de velocidade de avanço e rotação predomina o mecanismo de desgaste característico de *attrition*, região A, e com a elevação da velocidade de avanço e da rotação coexistem abrasão e *attrition*, região B. Nas faixas mais elevadas somente o desgaste abrasivo predomina, região C. Finalmente as regiões D e E mostram que para velocidades de avanço e rotações ainda maiores a deformação plástica e o desgaste por difusão surgem como mecanismos principais de desgaste como conseqüência da elevada temperatura do processo.

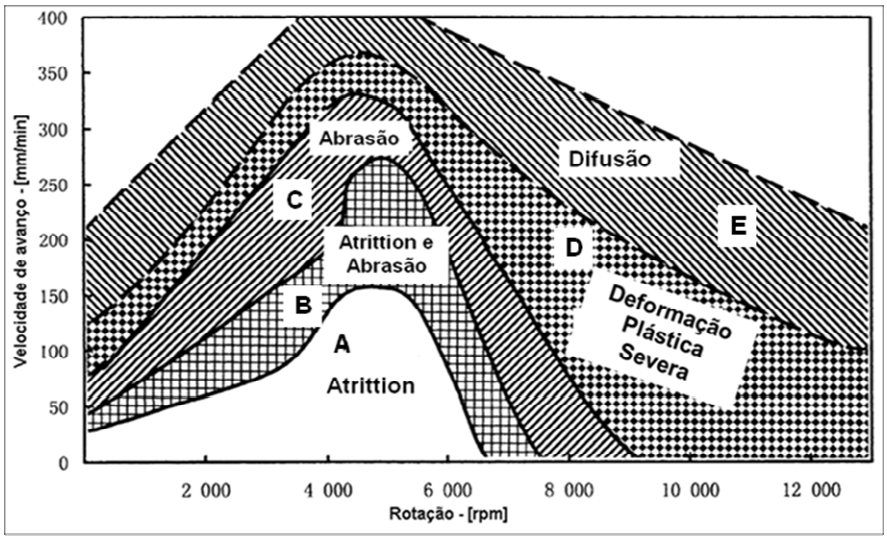

Figura 2.11 - Mapeamento dos mecanismos de desgaste de flanco para brocas de aço-rápido na usinagem da liga AlSi9Cu3 sem fluido de corte, diâmetro da broca 5,4 mm (Zhang et al., 2001)

2.6.2 Desgaste em brocas helicoidais

O desgaste em ferramentas de corte passa por estágios de desgaste. Inicialmente o desgaste é rápido, devido à adequação natural ao sistema tribológico envolvido, seguido por um período constante e finalmente por uma aceleração, promovendo num curto espaço de tempo, elevados níveis de temperatura e tensões que eventualmente conduzem a ferramenta ao colapso (Machado et al., 2009). No caso de brocas helicoidais o desgaste é um fenômeno progressivo e comparativamente lento enquanto que a avaria e a quebra da aresta principal de corte são normalmente catastróficas e repentinas (Ertunc et al., 2001). A Figura 2.12 ilustra a típica evolução de desgaste em uma broca helicoidal.

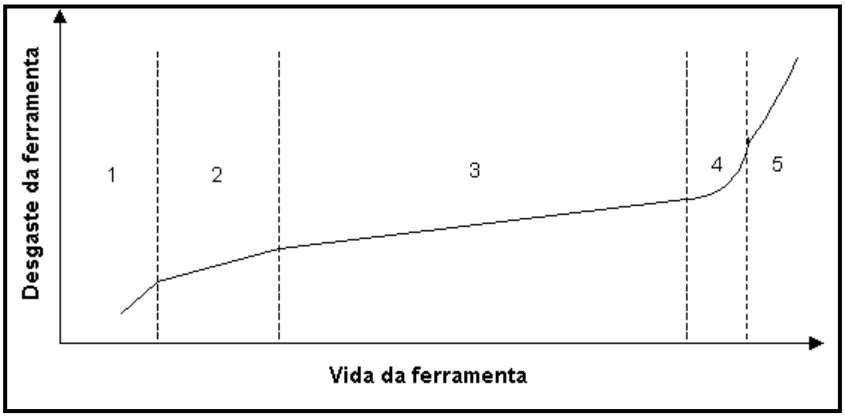

Figura 2.12 - Evolução do desgaste em brocas helicoidais: (1) desgaste inicial, (2) desgaste leve – regular, (3) desgaste moderado por microlascamentos, (4) desgaste severo e (5) colapso (Ertunc et al., 2001)

Segundo Bork (1995) as formas de desgaste em brocas helicoidais são classificadas em (Figura 2.13):

- Desgaste de flanco (VB) - ocorre ao longo de sua aresta de corte, podendo ser classificado ainda em desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de flanco máximo ($VB_{B\ máx}$);
- Desgaste das guias (H) - o comprimento médio “H”, medido sobre todas as guias da ferramenta em relação à sua aresta de corte;
- Desgaste de cratera (Kb) - corresponde à dimensão “Kb”, a qual é a medida do ponto mais afastado do lado oposto da cratera em relação a aresta de corte. Tal desgaste também pode ser dado por “KT”, caso seja expresso pela profundidade da cratera;
- Lascamento – os lascamentos nas arestas principais de corte da broca (medidas “Pm” para a largura e “Pt” para a profundidade), os quais também podem ocorrer na aresta transversal;
- Arredondamento das quinas - este tipo de desgaste se caracteriza pelo arredondamento da quina da broca, abrangendo ou não toda a largura da guia. Sua medida também corresponde ao valor médio do arredondamento de todas as quinas da ferramenta;
- Desgaste da aresta transversal-dimensionado através das medidas “Cm” (largura da faixa de desgaste) e “Ct” (ponto mais alto do desgaste);
- Colapso total – é definido como sendo simplesmente a destruição da broca (Schuitek et al., 1992; citado por De Andrade, 2005). Esta definição também considera a inutilização da broca por danos que não necessariamente venham destruí-la.

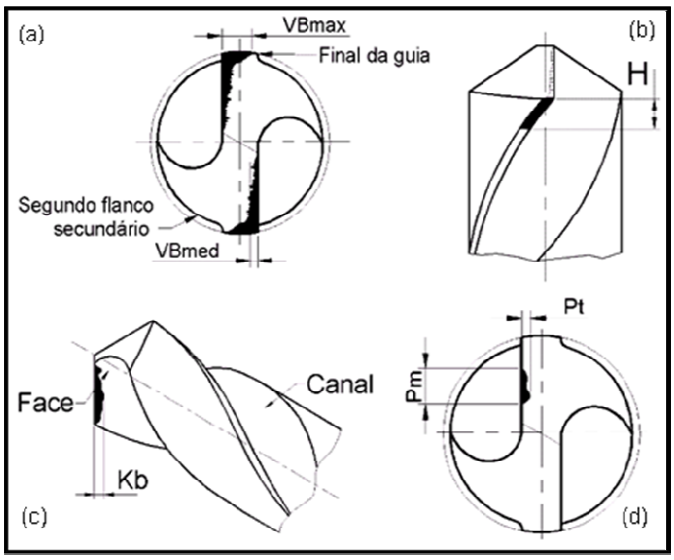

Figura 2.13 - Forma de desgaste em brocas helicoidais: (a) desgaste de flanco, (b) desgaste nas guias, (c) desgaste de cratera e (d) lascamento (Bork, 1995)

2.7 Forças e Potências na Furação de Ferro Fundido Austemperado e Nodular Perlítico

O conhecimento das forças atuantes nos processos de usinagem é de fundamental importância, pois elas afetam a potência de corte, a capacidade de obtenção de tolerâncias apertadas, a temperatura de corte e o desgaste da ferramenta (Diniz et. al., 2002). Além disso, a força de corte é uma importante variável, frequentemente utilizada como critério de usinabilidade.

Para o processo de furação, a força de usinagem atuante em cada uma das arestas da ferramenta é decomposta em força de corte (F), decorrente da resistência ao corte do material, força de avanço (F_f), devido a atuação da aresta transversal de corte e da resistência a penetração da peça a ser usinada, e força passiva (F_p) atuante em uma aresta principal com sentido oposto à força passiva atuante na outra, conforme apresentado na Fig. 2.14. Considerando a velocidade de avanço desprezível em relação a velocidade de corte, qualquer ponto selecionado das arestas da broca possuirá uma trajetória circular, na qual a força passiva será perpendicular, a força de corte será tangencial e a força de avanço possuirá a mesma direção do eixo da broca.

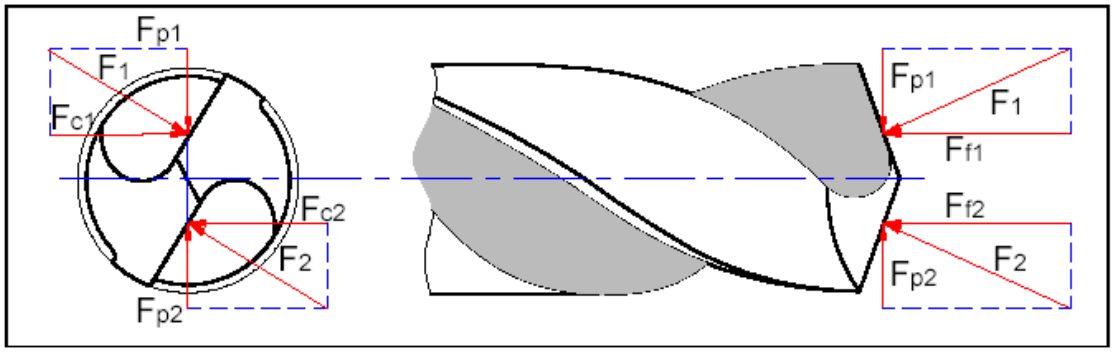

Figura 2.14 - Representação das forças de usinagem em furação (Bork, 1995 citado por Mocellin, 2002)

Uma broca helicoidal durante o corte é basicamente submetida a esforços de torção (devido a rotação da broca) e a esforços de compressão (devido ao avanço da ferramenta). Assim, para estimar os esforços de um processo de furação, basta calcular o momento torsor e a força de avanço do processo (Diniz et. al., 2002). O momento torsor pode ser medido diretamente através de um dinamômetro na peça ou na ferramenta, podendo ser expresso através da Eq. (2.1):

$$M_f = \frac{F_c \times D}{2000} = K_c \times \frac{f \times D^2}{8000} \quad [N \cdot m] \tag{2.1}$$

Onde:

F_c: força de corte;

D: diâmetro da broca;

f: avanço [mm/volta];

K_c: pressão específica de corte.

A força de avanço pode ser calculada através da Eq. (2.2) (Stemmer, 1995):

$$F_f = K_f \times \frac{f \times D \times \text{sen}\,\frac{\sigma}{2}}{2} [N] \tag{2.2}$$

Onde:

F_f: força de avanço;

D: diâmetro da broca;

f: avanço [mm/volta];

K_f: pressão específica de corte na direção normal à aresta, no plano de referência.

σ: tensão na broca

No processo de furação a potência de corte é resultante do produto do momento torsor pela velocidade angular da ferramenta (Sandvik Coromant, citado por Costa, 2004), dada pela Eq. (2.3) abaixo:

$$P_c = \frac{M_t \times 2 \times \pi \times n}{60000} = \frac{M_t \times n}{9549} \quad [KW] \tag{2.3}$$

2.7.1 Variáveis que Influenciam as Forças e a Potência na Usinagem de Ferro Fundido Austemperado e Nodular Perlítico

Os ferros fundidos são conhecidos por apresentarem relativamente baixas forças e potência de corte (Trent; Wright, 2000). Vários fatores são responsáveis por influenciar as forças e a potência de usinagem, dentre eles estão: material da peça e da ferramenta, geometria da ferramenta, revestimento da ferramenta, desgaste da ferramenta, condições de corte, fluido de corte, bem como o processo de usinagem. Dentre estes, a dureza, resistência, os níveis do tratamento térmico e a transformação martensítica são as variáveis mais influentes durante a usinagem de ferros fundidos austemperados (Seah; Sharma,

1994). Elementos de liga, as presenças de grafita, perlita e ferrita e a zona de fluxo também são fatores importantes para investigação da força na usinagem de ferros fundidos nodulares e vermiculares, pois alteram suas propriedades mecânicas (Seker; Hasirci, 2006).

2.8 Fluidos de Corte Empregados na Usinagem de Ferro Fundido Austemperado e Nodular Perlítico

Na indústria de manufatura sempre existe a necessidade de aumentar a produtividade e reduzir os custos de produção. Os fluidos de corte começaram a ser empregados justamente com esta finalidade, proporcionando a redução do desgaste da ferramenta e/ou o aumento da taxa de produção, permitindo o emprego de maiores velocidades e avanços no corte, quando estes são escolhidos e aplicados apropriadamente (Costa, 2004). Segundo Machado et al. (2009), *"a escolha apropriada de um fluido de corte deve recair naquele que possui composição química e propriedades corretas, para atacar as adversidades de um processo específico"*, devendo ser aplicado por um método que permita ao fluido chegar o mais próximo possível da interface cavaco-ferramenta para que suas funções tenham eficácia no processo.

Em operações de furação a função do fluido de remover o cavaco da região de corte é de suma importância para evitar a quebra da ferramenta pela desobstrução desse cavaco na zona de corte.

Geralmente na usinagem de ferros fundidos não se utiliza fluido de corte, pelo fato destes possuírem grafita em sua estrutura, a qual funciona como lubrificante sólido nas interfaces cavaco-ferramenta. Mas o uso de emulsão de óleo mineral pode ser útil para refrigerar e ajudar a remover o cavaco da região de corte.

2.8.1 Métodos de Aplicação e Vazão de Fluidos de Corte na Furação

Os fluidos de corte podem ser aplicados sob diversas direções, vazões, posicionadas na interface cavaco-ferramenta ou na peça. No processo de furação, os fluidos de corte podem ser aplicados das seguintes formas (Fig. 2.15):

- **Aplicação externa**: Nesta aplicação, através de um jato externo, o fluido é direcionado convenientemente para a região de interação entre a ferramenta e a peça. Sendo que esta forma de aplicação ainda pode ser subdividida em:

  - **Jorro de fluido a baixa pressão, ou por gravidade**: este sistema é o mais usado pela sua simplicidade. O fluido é jorrado sobre-cabeça

contra a superfície do cavaco, ou ainda na superfície de saída da ferramenta.

- **Pulverização (MQF: Mínima Quantidade de Fluido)**: bicos externos pulverizam uma quantidade mínima de lubrificante em um fluxo de ar comprimido. Utiliza-se geralmente o princípio de Venturi para fazer a mistura ar-fluido.

- **Aplicação Interna**: para fazer o fluido de corte chegar até a zona de corte podem ser utilizados canais convenientemente preparados nos suportes e/ou nas ferramentas. Esta forma de aplicação permite obter uma excelente penetração do fluido nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça. Porém o emprego desta técnica exige condições e características apropriadas no conjunto máquinas-ferramentas, suportes e ferramentas de corte, de modo a permitir a circulação dos fluidos até a zona de corte. Tudo isso se traduz em maiores custos dos equipamentos e exigem maiores cuidados com o ferramental (Teixeira, 2001).

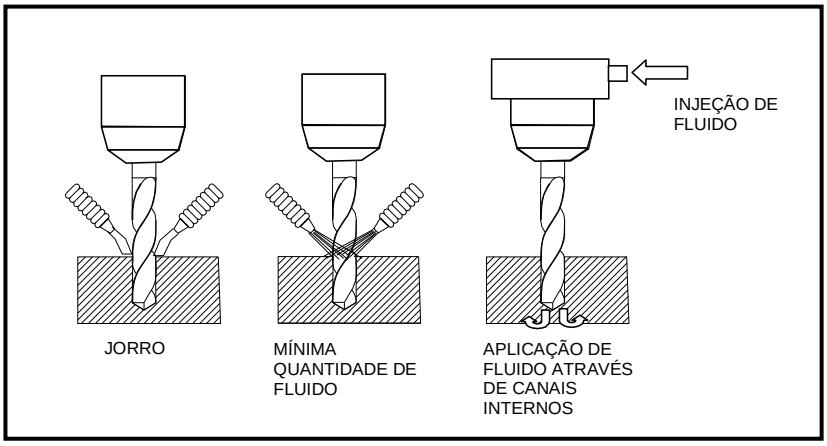

Figura 2.15 - Representação esquemática das formas de aplicação de fluido de corte (Santos, 2002)

2.9 Pesquisas na usinagem de Ferro Fundido Austemperado e Nodular Perlítico

As pesquisas sobre estes materiais ainda estão mais voltadas para a área de materiais e metalurgia, relacionados com a investigação de sua microestrutura, composição, tempo e temperatura em que são submetidos nos tratamentos térmicos a fim de analisar como estes fatores podem influenciar as suas propriedades. Poucas são as pesquisas sobre os ferros fundidos austemperados e nodular perlítico com referência a usinagem.

Os temas mais investigados estão relacionados com tempo e temperatura de austêmpera, nos ferros fundidos austemperados e microestrutura e elementos adicionados, nos ferros fundidos nodulares. Geralmente, para analisar como estes fatores influenciam as propriedades mecânicas destes materiais são realizados, juntamente com as análises microestrutural e dureza, ensaios de tração, fadiga e impacto. Testes de usinabilidade são também realizados, mais precisamente em torneamento.

Considerando a literatura consultada, conclui-se que pesquisas de furação nestes ferros ainda são escassas ou inexistentes, sendo que os poucos trabalhos encontrados utilizam o processo de torneamento. Por isso a necessidade em ampliar os estudos para outros processos, como o processo de furação, que é um dos mais utilizados industrialmente.

2.9.1 Principais Trabalhos na Área de Usinagem

Os principais trabalhos utilizando estes materiais com referência à usinabilidade estão relacionados abaixo:

- **Seah e Sharma (1995):** investigaram a usinabilidade de ferros fundidos austemperados ligados com níquel, em que foi estudada a evolução da usinabilidade deste material baseado em um índice de usinabilidade que relaciona a taxa de remoção de material e a unidade de potência consumida em várias velocidades de corte e avanços. Neste trabalho foram feitas análise de microestrutura e dureza, e os testes de usinabilidade foram realizados no processo de torneamento, utilizando ferramentas de aço-rápido. As peças eram de ferro fundido nodular bruto de fundição, tomado como padrão, e ferros fundidos nodulares austemperados ligados com diferentes quantidades de níquel e tratados em várias temperaturas. Foi monitorada a força tangencial para as várias condições de corte, sendo a profundidade de corte mantida constante. As Tabelas (2.4) e (2.5) mostram os resultados do teste de usinabilidade das ligas de ADI.

Tabela 2.4 - Resultados dos testes de usinabilidade das ligas de ADI para Vc = 9,50 m/min e seção do cavaco de 0,25 mm^2 (Seah; Sharma, 1995)

Liga 1 (contendo 0,5% Ni)			Liga 2 Contendo 1,0% Ni)		
Temperatura de austêmpera (℃)	**Unidade de potência (KW)**	**Índice de Usinabilidade**	**Temperatura de austêmpera (℃)**	**Unidade de potência (KW)**	**Índice de Usinabilidade**
300	0,0418	73,39	300	0,0405	75,76
340	0,0379	80,98	340	0,0392	78,28
380	0,0314	97,86	380	0,0301	102,10

Tabela 2.5 - Resultados dos testes de usinabilidade das ligas de ADI para Vc = 11,87 m/min e seção do cavaco de 0,25 mm^2 (Seah; Sharma, 1995)

Liga 1 (contendo 0,5% Ni)			Liga 2 Contendo 1,0% Ni)		
Temperatura de austêmpera (℃)	**Unidade de potência (KW)**	**Índice de Usinabilidade**	**Temperatura de austêmpera (℃)**	**Unidade de potência (KW)**	**Índice de Usinabilidade**
300	0,0379	58,56	300	0,0418	53,17
340	0,0366	60,65	340	0,0327	67,93
380	0,0366	60,65	380	0,0281	78,99

- **Neri e Carreño (2003):** estudaram os efeitos da adição de cobre na microestrutura e nas propriedades mecânicas de um ferro fundido nodular modificado, onde a usinabilidade foi relacionada com a microestrutura e a microdureza do ferro fundido nodular perlítico, utilizado na fabricação de virabrequins, onde foram detectados que no processo de furação destas peças, havia brocas que quebravam enquanto outras não. A Tabela 2.6 mostra os valores de microdureza encontrados, com suas respectivas microestruturas. De acordo com os valores encontrados de microdurezas concluíram que a usinagem é dificultada pela maior microdureza e, devido às regiões do virabrequim onde se concentravam perlitas finas, as brocas quebravam.

Tabela 2.6 - Microdureza Vickers medida na matriz de diferentes amostras de virabrequins (Neri; Carreño, 2003)

Amostra	Região Medida	Microdureza Vickers (Rockwell B)
M-1	Perlita fina	314,3 (106,5)
M-1	Perlita fina	304,7 (105,6)
B-1	Perlita grossa	267,8 (101,7)
B-1	Perlita grossa	267,2 (101,7)
M-2	Perlita fina	294,1 (104,5)
M-2	Perlita fina	293,4 (104,4)
B-2	Perlita grossa	269,1 (102)
B-2	Perlita grossa	269,8 (102,1)

- **Guesser et al. (2000):** estudaram a usinabilidade de perfis contínuos de ferros fundidos nodulares das classes FE-45012 e FE-50007 com diferentes percentuais de silício em suas composições químicas e, consequentemente, distintas microestruturas. A pesquisa foi realizada através de ensaios de torneamento de longa duração, tendo como parâmetro para avaliação da usinabilidade o desgaste no flanco das ferramentas de metal duro com múltiplas camadas de revestimento. A vida das ferramentas foi correlacionada com o teor de silício presente na microestrutura ao longo da seção transversal desses perfis e, também, a interação dessa microestrutura com a evolução do desgaste observado no flanco das ferramentas de usinagem. A Tabela 2.7 mostra a composição química dos materiais selecionados para o trabalho, sendo que os materiais B e D representam novos produtos das classes FE-45012 e FE-50007, respectivamente, com uma diminuição drástica no teor de silício. A Tabela 2.8 apresenta os resultados de dureza e ensaios metalográficos realizados nas amostras, em diferentes camadas do corpo de prova, correspondendo a:
    - 1ª camada - 1 a 8,5 mm a partir da superfície;
    - 2ª camada - 8,5 a 16 mm a partir da superfície;
    - 3ª camada - 16 a 23,5 mm a partir da superfície.

Concluíram que em operações de torneamento, os ferros fundidos nodulares com menores teores de silício apresentaram melhor usinabilidade, avaliada pelo desgaste de flanco de ferramentas de metal duro. Tal efeito é atribuído principalmente à diminuição do endurecimento da ferrita por solução sólida. As Figuras (2.16) e (2.17) apresentam alguns destes resultados.

Tabela 2.7 - Composições químicas dos materiais estudados (Guesser et al.,2000)

Classe	Material	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Mg %	Cu %
FE-45012	A	3,57	3,39	0,10	0,08	0,001	0,034	0,01
	*B	3,75	2,45	0,21	0,065	0,013	0,035	0,02
FE-50007	C	3,52	3,45	0,13	0,040	0,001	0,048	0,80
	*D	3,75	2,40	0,20	0,060	0,014	0,039	0,41

* materiais modificados

Tabela 2.8 - Resultados de dureza e de ensaios metalográficos dos materiais ensaiados (Guesser et al.,2000)

Material/	Dureza	%	%	Espaçamento	Microdureza HV		Grafita		
Camada	HB 2,5	cement.	perlita	interlamelar um	Perlita	Ferrita	forma	% noduliz	Nód/mm2
A/1	191	0	<5	0,8	306	214	VI	90	156
A/2	199	0	5-10	0,6	316	208	VI	90	145
A/3	195	0	10	0,7	327	213	VI	90	109
B/1	180	1	5	0,7	290	193	VI	95	522
B/2	180	0	15	0,6	307	179	VI	95	228
B/3	195	0	35	0,7	301	181	VI	95	138
C/1	292	0	60	0,7	277	ND	VI	95	575
C/2	285	0	60	0,7	277	ND	VI	95	330
C/3	285	0	70	0,7	277	ND	VI	95	123
D/1	244	2	60	0,7	270	158	VI	95	584
D/2	229	0	50	0,7	274	167	VI	95	275
D/3	234	0	40	0,7	278	167	VI	95	193

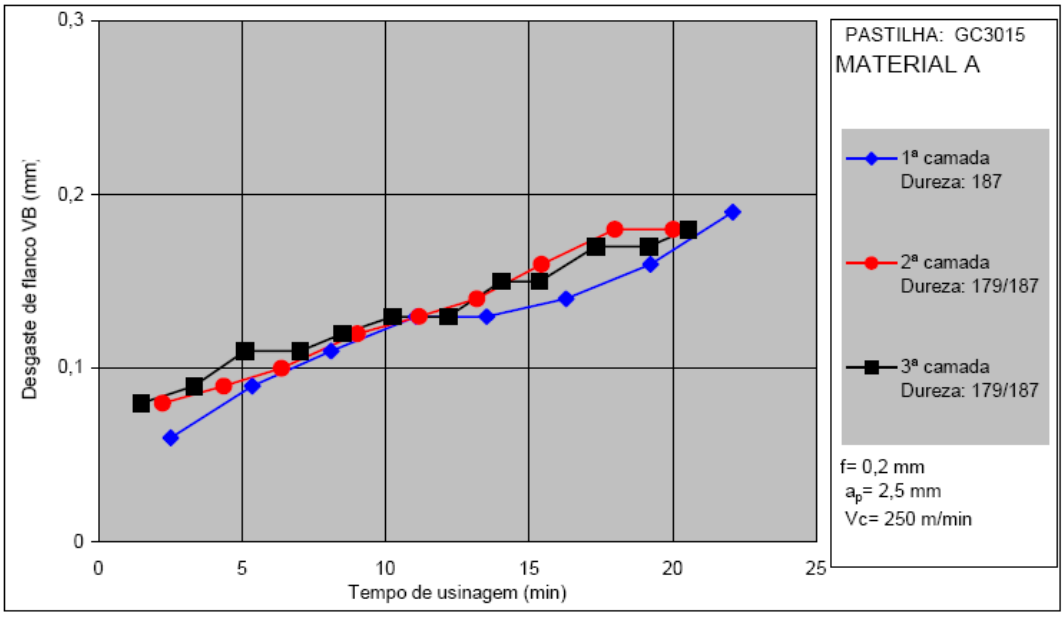

Figura 2.16 - "Tempo de usinagem x desgaste de flanco" para as três camadas do material A (Guesser et al., 2000)

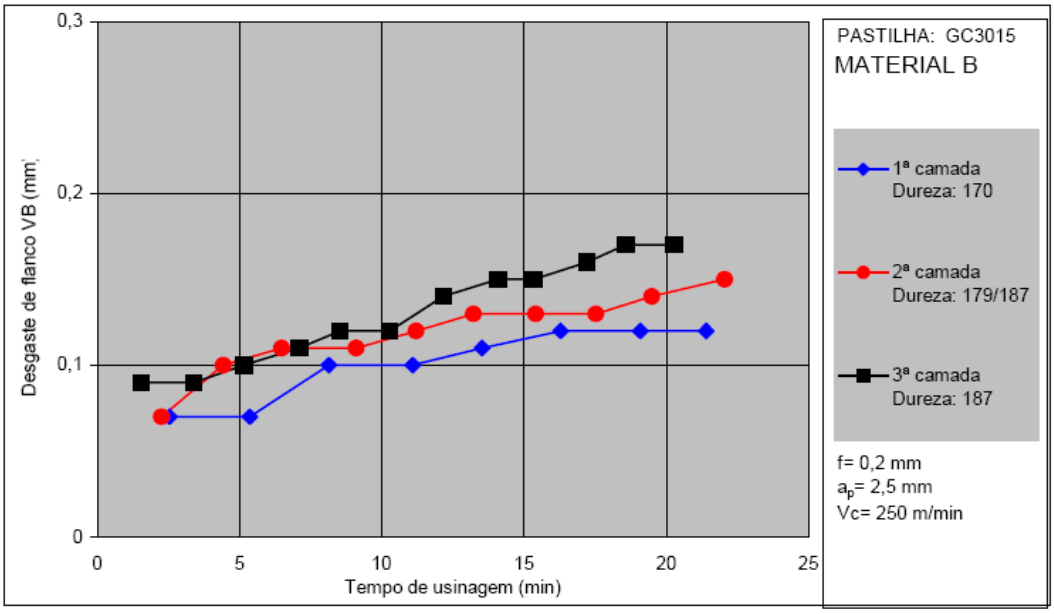

Figura 2.17 - "Tempo de usinagem x desgaste de flanco" para as três camadas do material B (Guesser et al., 2000)

2.10 Planejamento de Experimentos

A essência de um bom planejamento consiste em projetar um experimento de forma que ele seja capaz de fornecer o mais exato possível o tipo de informação que se procura. Para tanto, o conhecimento do que se está investigando, adquirido através de revisões bibliográficas, é importante para se definir o tipo de técnica adequada, realizando-se uma triagem das variáveis no intuito de descartar o que não for significativo.

A partir das variáveis mais importantes avaliam-se suas influências sobre a resposta, com um mínimo de experimentos possíveis, a fim de reduzir tempo e custos, pelo emprego de planejamentos fatoriais completos.

Para as pesquisas o maior interesse está na otimização do sistema investigado, seja minimizando ou maximizando a resposta, satisfazendo os critérios pré-estabelecidos, empregando-se técnicas superfície de resposta.

2.10.1 Planejamento Fatorial Completo

Um dos problemas dos experimentos é a determinação da influência de uma ou mais variáveis sobre outra variável de interesse, ou seja, a resposta depende dos fatores, os quais podem ser tanto qualitativos quanto quantitativos.

A Figura 2.18 esquematiza um sistema considerado como uma função ligando os fatores (variáveis de entrada) às respostas (variáveis de saída). Sendo que o objetivo da realização dos experimentos está em descobrir esta função ou pelo menos obter uma aproximação satisfatória para ela (De Barros Neto et al., 1995).

Figura 2.18 - Sistema considerado como uma função ligando fatores às respostas (De Barros Neto et al., 1995)

O planejamento de experimentos é definido como sendo a especificação detalhada das operações experimentais que devem ser realizadas e dependerá do objetivo particular que se queira atingir e cada objetivo requer um planejamento diferente, para que possa ser alcançado de forma eficaz (De Barros Neto et al., 1995).

O planejamento fatorial a dois níveis é um tipo particular de planejamento experimental (Box et al., 1978), que é de grande utilidade em investigações preliminares, quando se deseja saber se determinados fatores têm ou não influência sobre a resposta. São métodos simples de executar e podem ser ampliados para formar um planejamento mais sofisticado, necessário quando se requer conhecer melhor a relação funcional existente entre a resposta e os fatores.

Por outro lado, quando o número de variáveis de entrada é grande e quando se deseja fazer apenas uma triagem inicial é vantajoso começar pela execução de um planejamento fatorial incompleto, o chamado Planejamento Fatorial Fracionário, que corresponde a uma fração do número de ensaios do Planejamento Completo.

2.10.1.1 *Planejamento Fatorial* 2^K

Para executar um planejamento fatorial precisa-se em primeiro lugar especificar os níveis em que cada fator será estudado, isto é, os valores para os fatores quantitativos e as versões para os fatores qualitativos (por exemplo: tipo de material e tipo de fluido de corte) que serão empregados nos experimentos. O mais simples seria a variação dos fatores em dois níveis, o chamado Planejamento Fatorial a Dois Níveis (De Barros Neto et al., 1995).

Um planejamento fatorial requer a execução de experimentos para todas as possíveis combinações dos níveis dos fatores, e cada um desses é um ensaio experimental (De Barros Neto et al., 1995).

Havendo *k* fatores, isto é, *k* variáveis controladas, o planejamento fatorial a dois níveis irá requerer a realização de 2^k ensaios diferentes, sendo este conhecido como Planejamento Fatorial 2^k.

Alguns fatos importantes estão relacionados com esse tipo de planejamento (Box et al., 1978):

- Apesar de usarem um número pequeno de experimentos por fator, estes planejamentos podem indicar tendências e direções da pesquisa;
- É possível aumentar esses experimentos para formar planejamentos compostos;
- É possível trabalhar com frações de planejamentos fatoriais a dois níveis;
- A interpretação dos resultados é dada diretamente por aritmética elementar.

Quando o número de fatores é igual a 4 (que será adotado no presente trabalho), correspondendo assim, na realização de 2^4 (ou dezesseis) ensaios, o planejamento é representado pela matriz da Tab. 2.9, a qual lista os ensaios na ordem padrão. No caso de réplicas dos ensaios, para se ter uma estimativa do erro experimental e avaliar a reprodutividade dos resultados, um número de experimentos maior será necessário.

Tabela 2.9 - Matriz de Planejamento 2^4

	Fator			
Ensaios	**1**	**2**	**3**	**4**
1	-	-	-	-
2	+	-	-	-
3	-	+	-	-
4	+	+	-	-
5	-	-	+	-
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	-
9	-	-	-	+
10	+	-	-	+
11	-	+	-	+
12	+	+	-	+
13	-	-	+	+
14	+	-	+	+
15	-	+	+	+
16	+	+	+	+

(+) representa o nível superior do fator; (-) representa o nível inferior.

A partir da matriz de planejamento podem-se determinar os coeficientes de contraste multiplicando um a um os sinais das colunas dos efeitos dos fatores principais (1, 2, 3 e 4) para obter as colunas correspondentes aos efeitos das interações dos fatores (12, 13, 14, 23, 24, 34, 123, 134, 234, 1234).

2.10.1.2 *Cálculo dos Efeitos Principais e de Interação das Variáveis*

O efeito principal de um fator é dado pela diferença entre médias: $\bar{y}_+ - \bar{y}_-$, onde $\bar{y}_+$ é a resposta média para o nível superior da variável (sinal +) e $\bar{y}_-$ é a resposta média para o nível inferior da variável (sinal –).

Os efeitos de interação de dois fatores são dados pela diferença entre os efeitos médios dos dois fatores e a interpretação dos resultados é dada pelo efeito da média juntamente com os efeitos principais e os efeitos de interação com dois fatores (De Barros Neto et al., 1995).

CAPÍTULO III

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 Aspectos Gerais

Este capítulo visa descrever detalhadamente o procedimento experimental utilizado para o desenvolvimento do trabalho. A Figura 3.1 apresenta o fluxograma da metodologia utilizada.

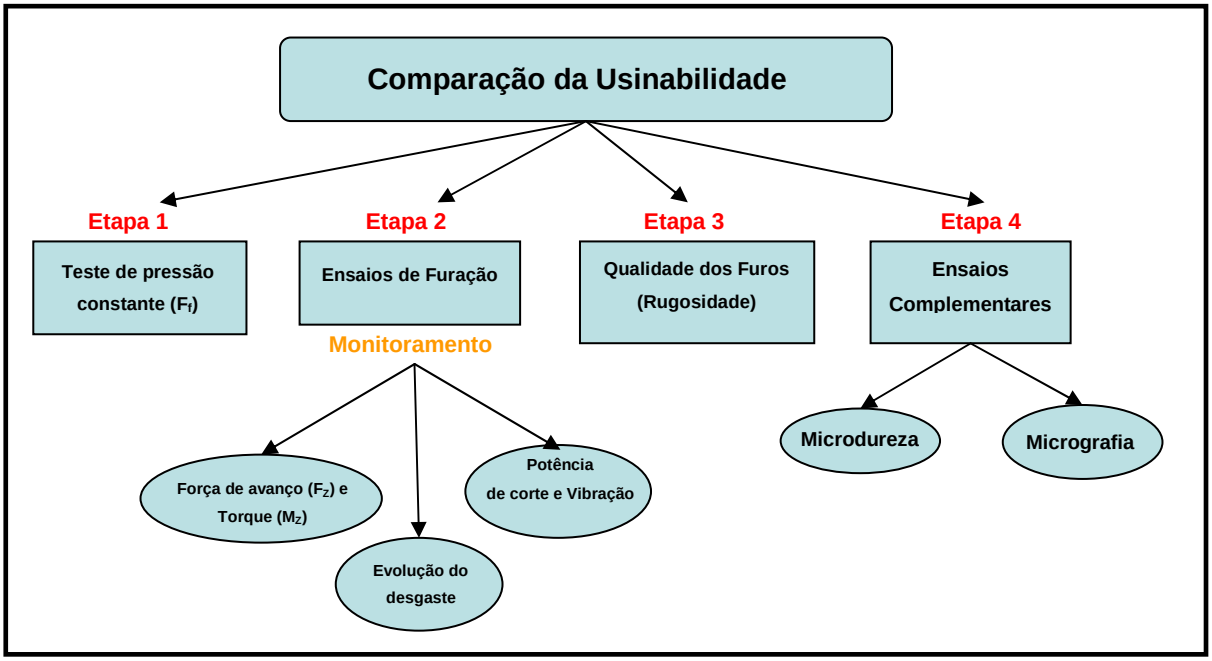

Figura 3.1 - Fluxograma da Metodologia Experimental

A pesquisa foi dividida em quatro etapas principais e cinco sub-etapas como mostrado acima, contemplando inicialmente um teste de usinabilidade de curta duração, o teste de pressão constante, um teste de vida da ferramenta na furação (etapa 2), de longa duração, onde foram acompanhados a evolução do desgaste da ferramenta e o monitoramento da força de avanço, do torque, da potência de corte e da vibração. Após os

ensaios de furação foram realizadas medições de rugosidade (etapa 3) para avaliar a qualidade dos furos. Finalmente, nos ensaios complementares (etapa 4) foram realizadas medições de microdureza e análise da microestrutura próxima à parede dos furos a fim de verificar possíveis transformações martensíticas nos ADIs.

A seguir segue a descrição dos materiais e as ferramentas empregadas, além do detalhamento de cada etapa da metodologia apresentada.

3.2 Material da Peça

Os corpos de prova foram fornecidos pela Tupy S.A. em forma de bolachas cilíndricas com 104 mm de diâmetro e, com, aproximadamente, 33 mm de espessura. Para a execução do trabalho foi necessária uma preparação destes corpos de prova, sendo estes faceados de forma a manter uma espessura padronizada de 30 mm e um menor erro de paralelismo para se adequarem ao suporte confeccionado, permitindo então a execução dos furos passantes, além de evitar efeitos de escorregamento da broca durante o início da furação. Os ferros fundidos, ligados com 0,5% Cu e 0,2% Mo, utilizados foram receberam a seguinte denominação:

- DI (ASTM FE 70003): Ferro Fundido Nodular Perlítico bruto-de-fundição;
- ADI I (ISO 1.050-6): Ferro Fundido Nodular Perlítico austenitizado a 900℃ por 2h e austemperado a 360℃ por 2h;
- ADI II (ISO 800-10): Ferro Fundido Nodular Perlítico austenitizado dentro da zona crítica (austenitizado a 780℃ por 5h e austemperad o a 360℃ por 2h).

A Tabela 3.1 informa a composição química do ferro fundido nodular utilizado na pesquisa.

Tabela 3.1 - Composição Química do Ferro Fundido Nodular Perlítico (ASTM FE 70003)

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Cu %	Mo %	Mg %
3,6	2,5	0,25	0,05	0,015	0,06	0,46	0,23	0,04-0,05

As Tabelas (3.2) e (3.3) apresentam as características metalográficas e dureza Brinell dos materiais, obtidas através de um relatório fornecido pela Tupy S.A. As microestruturas são mostradas nas Figs. (3.2), (3.3) e (3.4).

Tabela 3.2 - Características Metalográficas dos materiais de trabalho

Amostra	Região	Matriz	Grafita			
			Forma	Nodularização (%)	Nódulos (p/ mm²)	Tamanho
DI	Periferia	Perlita c/ ~1% de ferrita	VI	95	418	7-6
	Médio Raio	Perlita c/ ~2% de ferrita	VI	90	182	5-6
	Núcleo	Perlita c/ ~4% de ferrita	VI	90	155	5-6
ADI I	Periferia	Bainita	VI	95	355	7-6
	Médio Raio	Bainita	VI	90	195	5-6
	Núcleo	Bainita	VI	90	136	5-6
ADI II	Periferia	Ferrita c/ Ausferrita	VI	95	412	7-6
	Médio Raio	Ausferrita c/ Ferrita e resíduos de perlita fina	VI	90	218	5-6
	Núcleo	Ausferrita c/ Ferrita e resíduos de perlita fina	VI	90	166	5-6

Tabela 3.3 - Dureza Brinell dos materiais

Amostra	Dureza Brinell (HB 5/750)		
	Periferia	Médio raio	Núcleo
DI	260	269	263
ADI I	275	288	288
ADI II	174	203	207

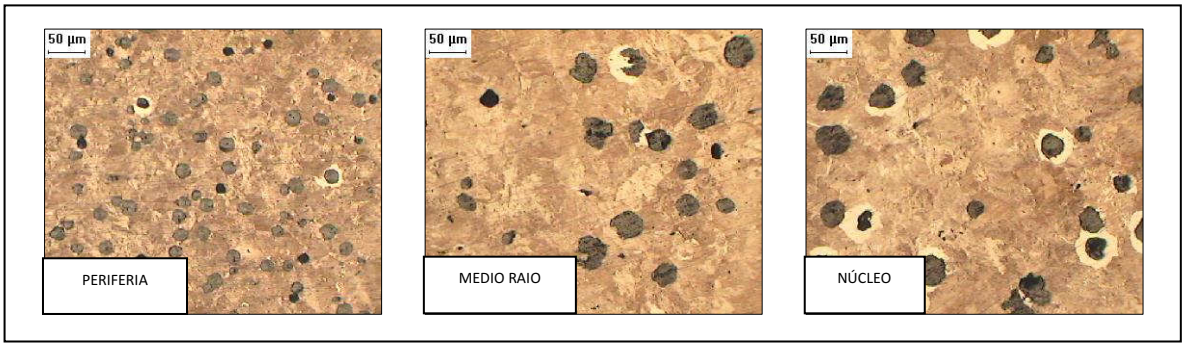

Figura 3.2 - Micrografias representativas da amostra DI, (periferia, médio raio e núcleo), onde se observa o nódulo de grafita e a matriz perlítica com pouca ferrita. Ataque Nital 3%

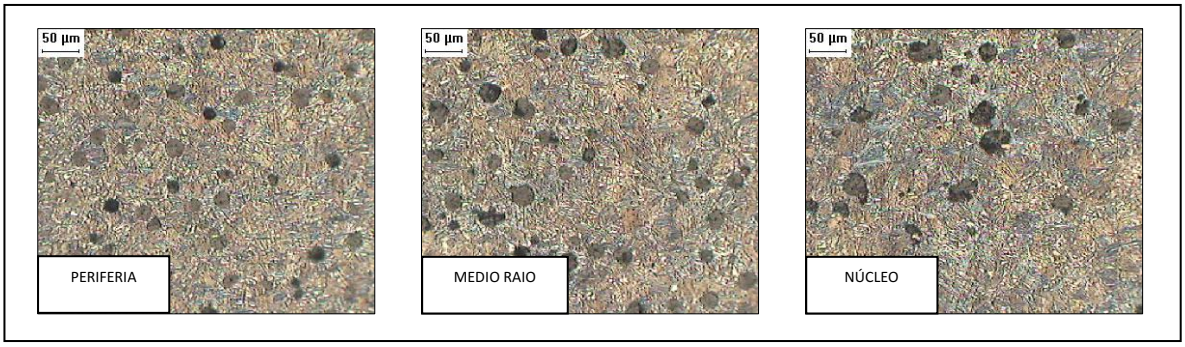

Figura 3.3 - Micrografias representativas da amostra ADI I, (periferia, médio raio e núcleo), onde se observa o nódulo de grafita e a matriz bainítica. Ataque Nital 3%

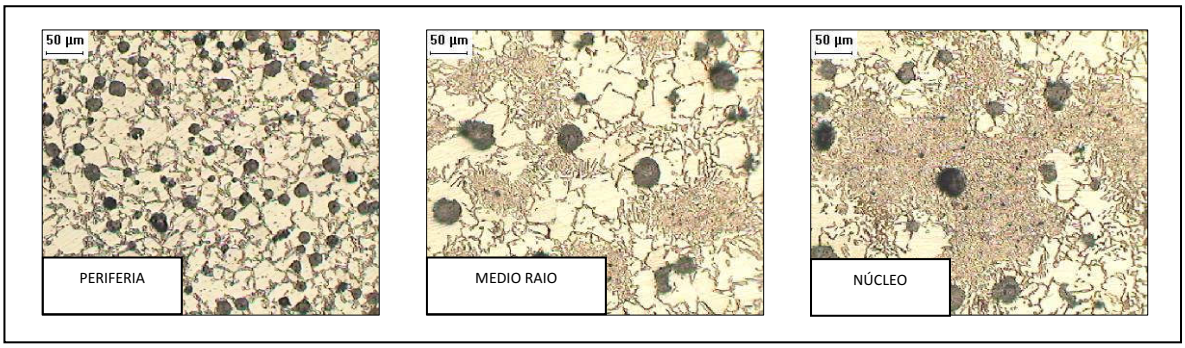

Figura 3.4 - Micrografias representativas da amostra ADI II, (periferia, médio raio e núcleo), onde se observa na periferia: nódulos de grafita e a matriz ferrita com bainita. No médio raio e no núcleo: nódulos de grafita e a matriz bainítica com ferrita e resíduos de perlita fina. Ataque Nital 3%

3.3 Suporte para Fixação da Peça ao Barramento da Máquina-Ferramenta

O suporte foi confeccionado a partir de um bloco de ferro fundido cinzento com dimensão de 220x140x50 mm, onde foi executado um rebaixo de 102 mm de diâmetro no meio do bloco com uma profundidade 15 mm, de modo a permitir a execução de furos

passantes sem contato com o suporte e um espaço para acomodação de cavacos. Além do rebaixo o suporte também contem canais para evacuação dos cavacos e fluido de corte e pinos para melhor alinhamento do corpo de prova. Este suporte é fixado ao barramento por meio de parafusos, os quais também tinham a finalidade de prender as bolachas. A Figura 3.5 apresenta a foto do suporte.

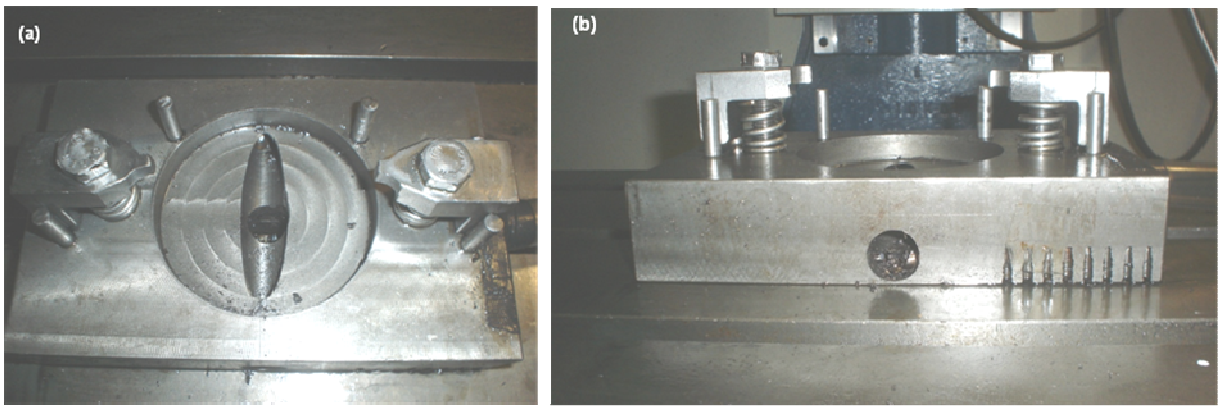

Figura 3.5 - Suporte para fixação do corpo de prova no barramento da máquina-ferramenta. (a) vista superior, (b) vista frontal

3.4 Ferramenta de Corte

A ferramenta de corte foi mantida como uma constante, sendo esta uma broca helicoidal de metal duro, K20, com revestimento multicamadas TiN/TiAlN e Ø = 10 mm, especificação CoroDrill® Delta C-840, fabricada pela Sandvik Coromant. A Figura 3.6 apresenta a configuração da ferramenta utilizada e a Fig. 3.7 o tipo de revestimento.

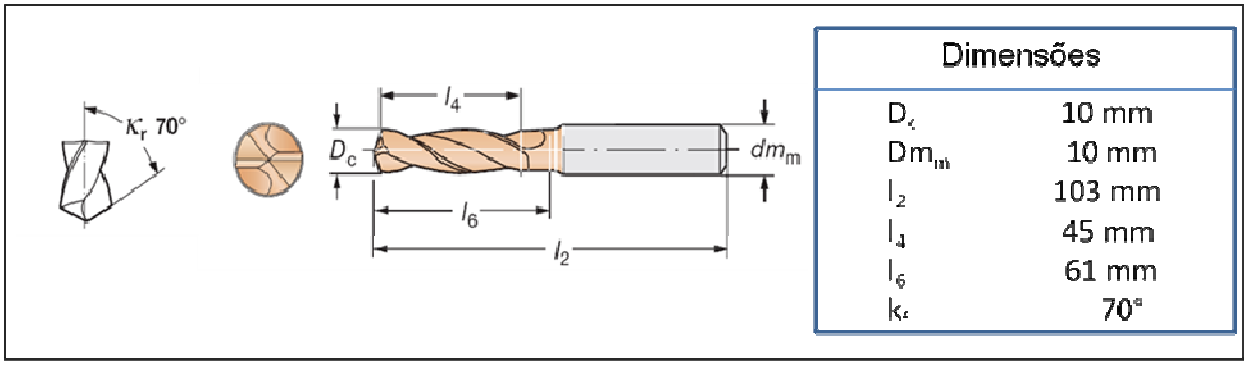

Figura 3.6 - Broca utilizada nos experimentos (Sandvik Coromant, 2008)

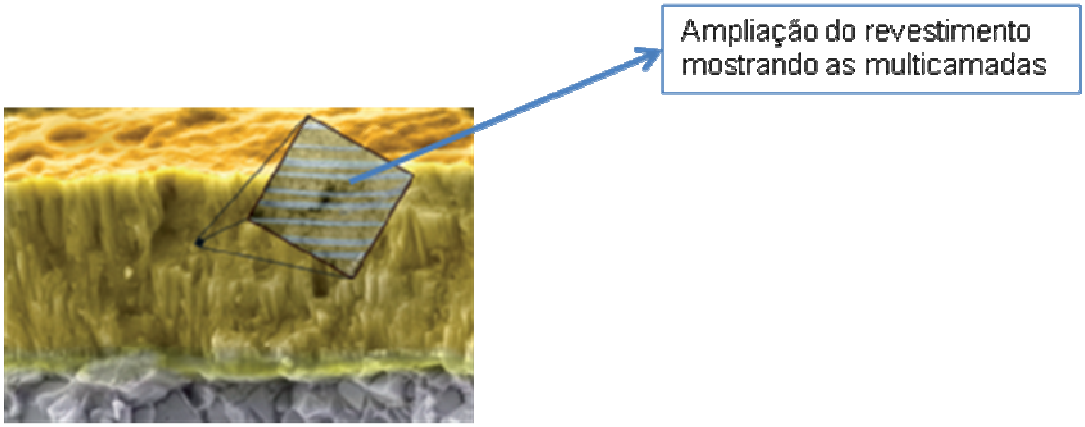

Figura 3.7 - Revestimento TiN/TiAlN multicamada (Sandvik Coromant, 2008)

3.5 Teste de Pressão Constante (F_f)

O Teste de Pressão Constante ou de força de avanço (Ff) constante é um ensaio de usinabilidade de curta duração que consiste, no processo de furação, em aplicar uma força de avanço constante e medir o tempo para se furar uma chapa de espessura fixa, ou medir o percurso de avanço em um tempo pré-determinado, que serão os indicadores de usinabilidade. A força de avanço constante pode ser facilmente conseguida em uma furadeira de coluna ou de bancada, por meio de uma roldana com um cabo de aço e um prato com pesos adaptado no eixo de avanço da máquina (Machado et al., 2009), como mostrado na Fig. 3.8.

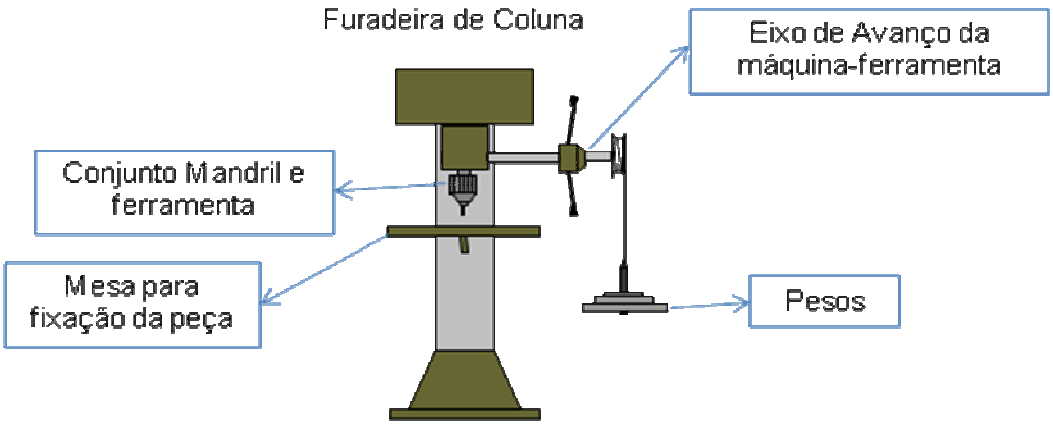

Figura 3.8 - Esquema do equipamento utilizado no teste de pressão constante

No presente trabalho, para a comparação da usinabilidade, foi realizado um teste de Pressão Constante (F_f), que consistiu basicamente, em furar, a seco, uma amostra de material durante um tempo fixo pré-determinado de 20 segundos, considerando a medida da

usinabilidade o percurso de avanço (ou profundidade de penetração da broca), L_f, atingido ao fim deste período de tempo. O teste foi realizado, segundo um planejamento fatorial completo 2^3, que consiste de três fatores (rotação, peso e material) variados em dois níveis, dos quais dois são fatores quantitativos (rotação e peso) e um fator é qualitativo (material). Foi realizado primeiramente, um planejamento para comparar os dois tipos de ADI, e o melhor deles foi comparado com o Nodular Perlítico, ou seja, foram executados dois planejamentos 2^3, sendo que para a última comparação foram realizados apenas quatro ensaios referentes ao Nodular Perlítico, já que se puderam utilizar os resultados referentes ao melhor ADI comparado anteriormente. O ferro fundido austemperado com o pior resultado também foi comparado com o DI para critério de contraprova. Foram necessárias mais uma réplica dos ensaios, para avaliar a reprodutividade dos resultados. Utilizou-se para esta etapa do trabalho uma ferramenta para cada material, ou seja, foram utilizadas seis brocas, referentes ao ensaio mais a réplica. A Tabela 3.4 mostra os fatores com os respectivos níveis empregados e a Tab. 3.5 apresenta a configuração do planejamento utilizado.

Tabela 3.4- Variáveis de entrada à dois níveis

Variável	**Nível (-1)**	**Nível (+1)**
Rotação (n) [RPM]	1107	1925
Força de Avanço (F_f) [Kgf]	7,426	16,340
Material da peça	ADI II / DI	ADI I / DI

Tabela 3.5 - Planejamento fatorial 2^3

Ensaios	**N (RPM)**	**F_f (Kgf)**	**Material**
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

3.6 Ensaios de Furação (Vida da Ferramenta)

Os testes de vida da ferramenta foram desenvolvidos no processo de furação segundo um planejamento fatorial completo 2^4, consistindo em duas variáveis quantitativas, velocidade de corte (Vc) e avanço (f), e duas variáveis qualitativas, material e tipo de aplicação de fluido de corte. Primeiramente, foi utilizado um planejamento para comparar as duas classes de ADIs, e na sequência o melhor deles dos ferros fundidos austemperados foi comparado com o Nodular Perlítico, ou seja, foram executados dois planejamentos 2^4, sendo que para a última comparação foram realizados apenas oito ensaios referentes ao Nodular Perlítico, já que se puderam utilizar os resultados referentes ao melhor ADI comparado anteriormente. Para os ensaios de vida da ferramenta também se comparou o ferro fundido austemperado com ode pior desempenho com o DI para efeito de contraprova.
Foram usinados furos passantes com um percurso de avanço (comprimento de penetração) (L_f) de 35 mm, realizados no Centro de Usinagem CNC Discovery 760 Romi, com 15 KVA de potência total instalada e rotação máxima no eixo-árvore de 10000 RPM, onde foi elaborado um programa CNC para realização da seqüência de furos, de modo a obter o maior aproveitamento do corpo de prova, além de paradas previstas para medição e registro dos parâmetros de saída estipulados (desgaste, forças, potência de corte e vibração do sistema). A Figura 3.9 mostra a vista frontal da máquina-ferramenta.

Figura 3.9 - Centro de Usinagem CNC Discovery 760, utilizado nos testes de furação

A Tabela 3.6 apresenta os fatores, que foram variados em dois níveis. A Tab. 3.7 mostra a configuração do planejamento utilizado, de forma que cada ensaio corresponde a

um corpo de prova, ou seja, para cada teste do planejamento foram executados 54 furos, nos quais foram monitoradas as variáveis de saída citadas anteriormente, para o acompanhamento dos sinais ao longo da vida da ferramenta.

Tabela 3.6 - Variáveis de entrada à dois níveis

Variável	Nível (-1)	Nível(+1)
Vc [m/min]	110	140
f [mm/volta]	0,15	0,25
Material	ADI II/DI	ADI I/DI
Fluido de Corte	Jorro (982 l/h)	MQF (50 ml/h)

Tabela 3.7 - Planejamento fatorial 2^4

Ensaios	Vc [m/min]	f [mm/volta]	Fluido de Corte	Material
1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	-1
3	-1	+1	-1	-1
4	+1	+1	-1	-1
5	-1	-1	+1	-1
6	+1	-1	+1	-1
7	-1	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1	-1
9	-1	-1	-1	+1
10	+1	-1	-1	+1
11	-1	+1	-1	+1
12	+1	+1	-1	+1
13	-1	-1	+1	+1
14	+1	-1	+1	+1
15	-1	+1	+1	+1
16	+1	+1	+1	+1

A Figura 3.10 mostra a configuração dos furos nos corpos de prova realizados na etapa de furação, podendo também ser observado, na Fig. 3.11, a seqüência de cada ciclo de furação previsto, para as paradas para o monitoramento de desgaste das brocas. Para cada teste foi utilizada uma ferramenta nova.

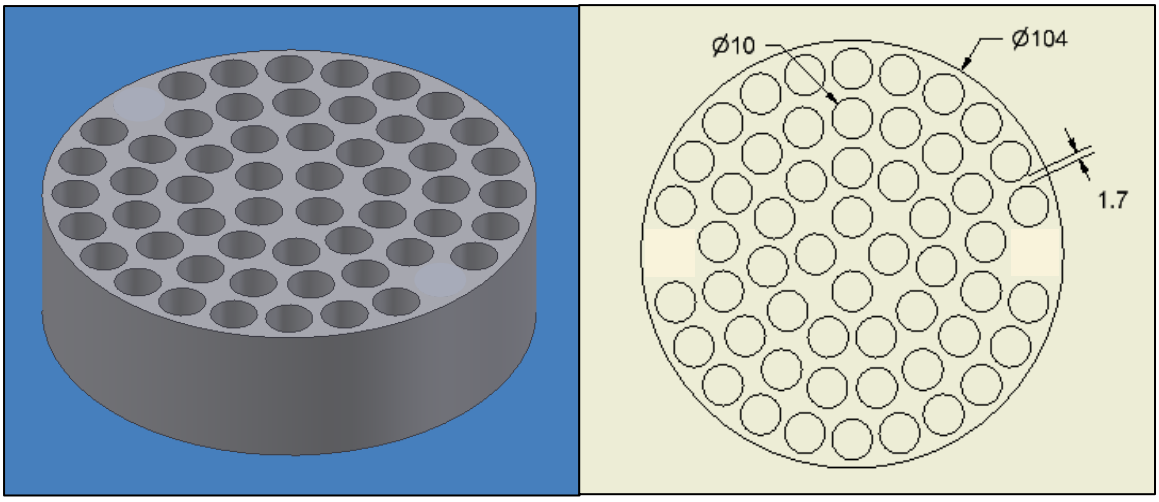

Figura 3.10 - Dimensões e distribuição dos furos passantes no corpo de prova

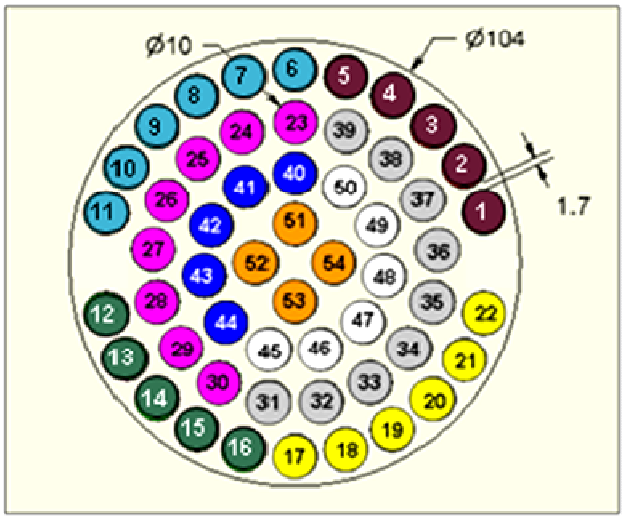

Figura 3.11 - Seqüência dos ciclos de furação no corpo de prova

A aplicação externa de fluido de corte foi feita de duas formas, através de jorro utilizando-se três bicos, proporcionando uma vazão de 982 l/h de óleo emulsionável a base de óleo vegetal Vasco 1000, da Blaser Swisslube, a uma concentração de 9%; e pelo método de MQF (mínima quantidade de fluido), pulverizando fluido sintético Vacomill MMS SE1, também da Blazer Swisslube, com uma vazão de 50 ml/h por dois bicos. A Figura 3.12 mostra as configurações de aplicação de fluido de corte.

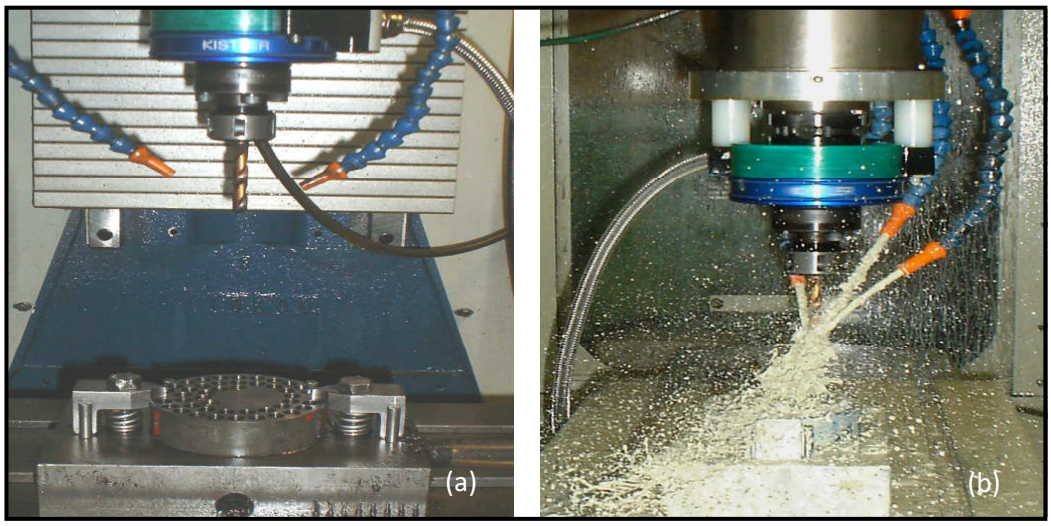

Figura 3.12 - Configuração do tipo de aplicação do fluido de corte: (a) dois bicos – MQF, (b) três bicos – Jorro

3.6.1 Monitoramento da Potência de Corte e Vibração

A potência de corte e a vibração foram monitoradas durante a execução dos primeiros furos das seqüências do ciclo de furação como destacado em vermelho na Fig. 3.13. Para análise dos resultados foi considerada a média simples de cada seqüência de furos monitorados para critério de evolução ao longo do teste.

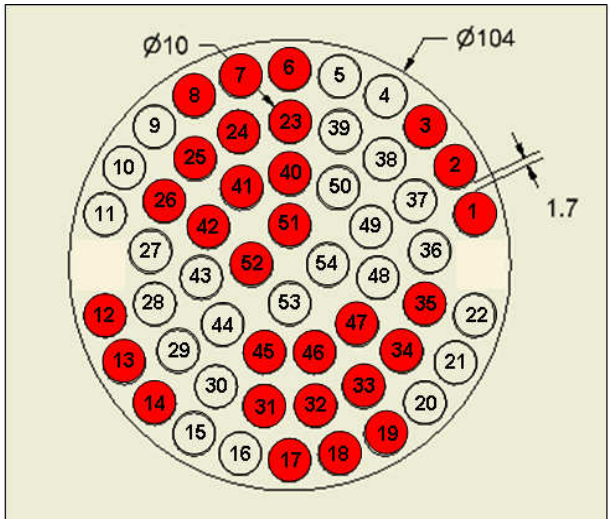

Figura 3.13 - Furos destacados em vermelho utilizados para o monitoramento da potência consumida e vibração

A potência de corte foi determinada indiretamente através da aquisição de sinais da corrente e da tensão que alimentavam as fases do motor principal do centro de usinagem, utilizando-se sensores de efeito Hall modelo NW – SCD – 50 – R, cuja faixa de intensidade da corrente é de 0 a 50 A e tensão de alimentação de ± 9 VDC, com sinal de saída na faixa

de 0 a 5 VDC. O software LabView 6.5® fez o gerenciamento dos sinais de potência transmitidos pela placa de aquisição de sinais, PowerDAQ modelo PD2 – MFS – 8 – 500/14. A cada medição foram coletados valores em vazio e valores durante a usinagem e a diferença entre ambos resulta na potência de corte consumida.

A vibração foi monitorada simultaneamente com a potência de corte, através de um acelerômetro da marca Brüel & Kaer colado no suporte do corpo de prova, que estava fixo ao barramento do centro de usinagem por meio de parafusos, como esquematizado na Fig. 3.14. O sinal capitado pelo acelerômetro foi transmitido a um amplificador de sinais também da marca Brüel & Kaer, onde foi utilizada uma faixa de freqüência de aquisição de 1 a 10 KHz. Uma placa de aquisição de sinais, PowerDAQ modelo PD2 – MFS – 8 – 500/14, enviava os valores coletados ao LabView 6.5® para serem processados.

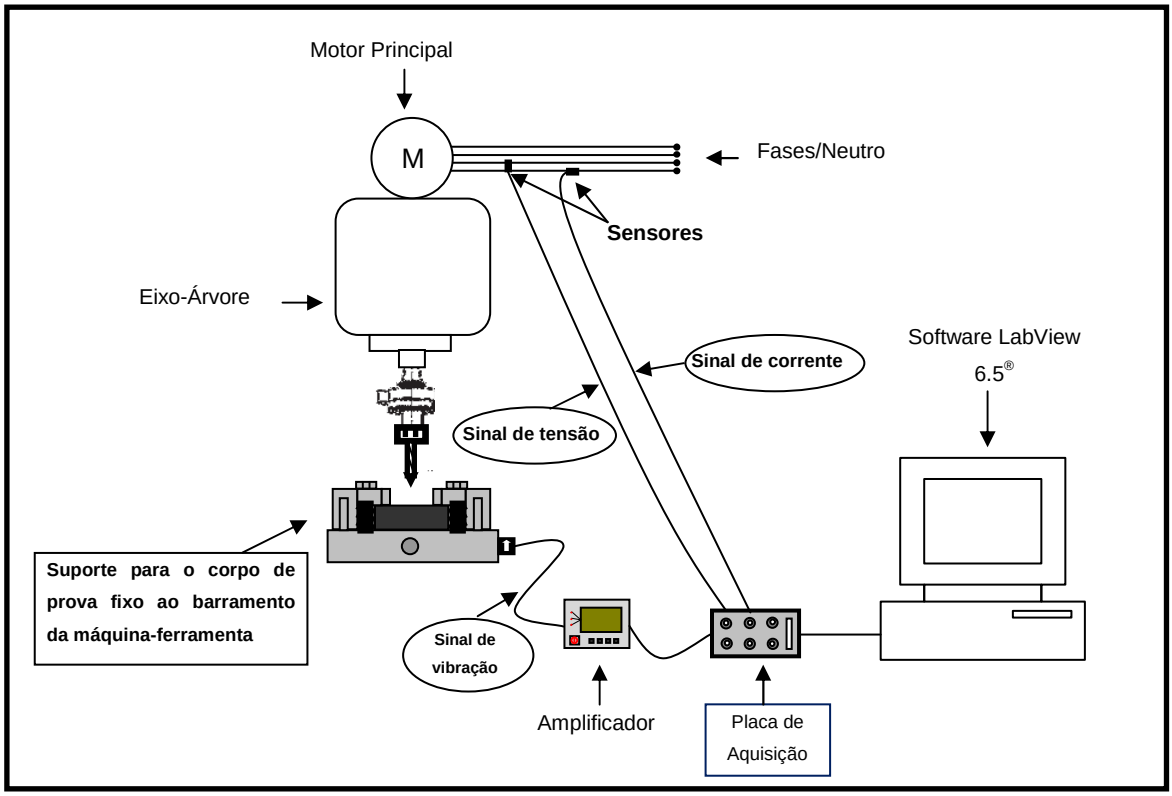

Figura 3.14 - Diagrama esquemático para monitoramento dos sinais de vibração e potência

Para cada medição dos parâmetros de saída em questão foram adquiridos 2000 pontos por segundo a cada medição, compreendendo um tempo de medição de 15s. As análises foram realizadas com base nas médias das seqüências dos furos monitorados ao longo do teste.

3.6.2 Monitoramento da Força de Avanço (Fz) e Torque (Mz)

A força de avanço e o torque foram monitorados através de um dinamômetro rotativo modelo 9124B e condicionador de sinais 5223B da marca Kistler e software Labview®. O dinamômetro admite rotação máxima de 10000 RPM, os sinais de tensão recebidos são digitalizados e transmitidos por telemetria ao estator, que por sua vez passa por um condicionador de sinais que possui dois intervalos de medição, o qual transforma os sinais em mV, através da sensibilidade, em sinais de força (N). Para este trabalho foi utilizado o intervalo de medição "Range 1", onde a faixa de medição varia de ±20 KN para F_Z e de ±200 Nm para M_Z. Os sinais captados pelo condicionador são enviados a placa de aquisição, PowerDAQ modelo PD2 – MFS – 8 – 500/14, para serem processados pelo software LabView®, da National Instrument. A Figura 3.15 mostra o esquema de montagem do equipamento utilizado para as medições de força de avanço e torque.

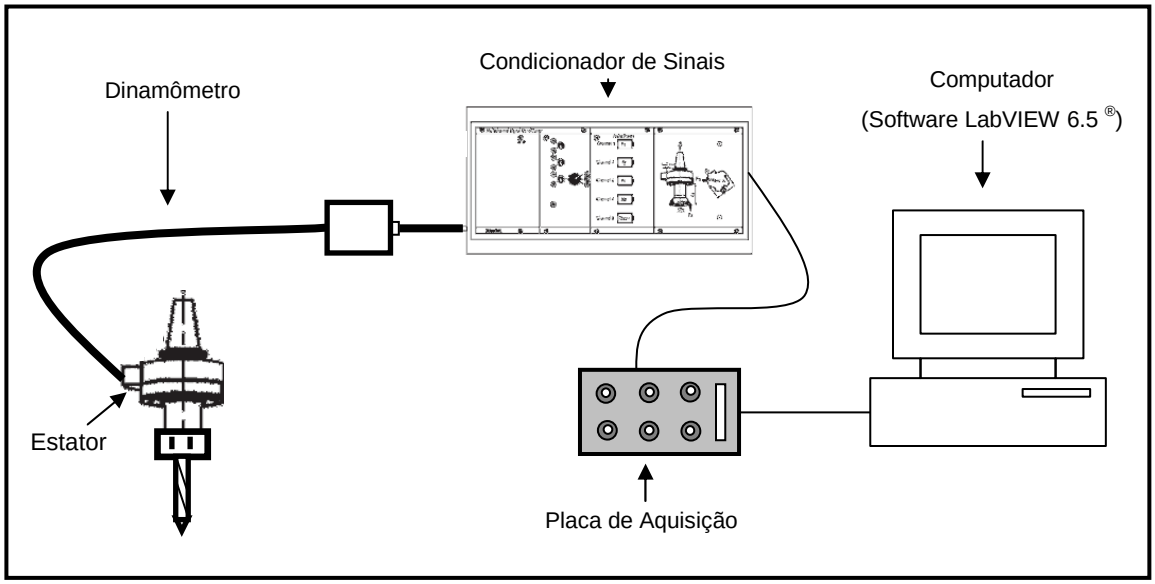

Figura 3.15 - Diagrama esquemático para monitoramento dos sinais de força de avanço e torque

O acompanhamento destas variáveis de saída foi realizado durante a execução dos últimos furos de cada seqüência do ciclo de furação como destacado em azul na Fig. 3.16. Para análise foi considerada a média simples da seqüência de furos monitoradas ao longo do teste.

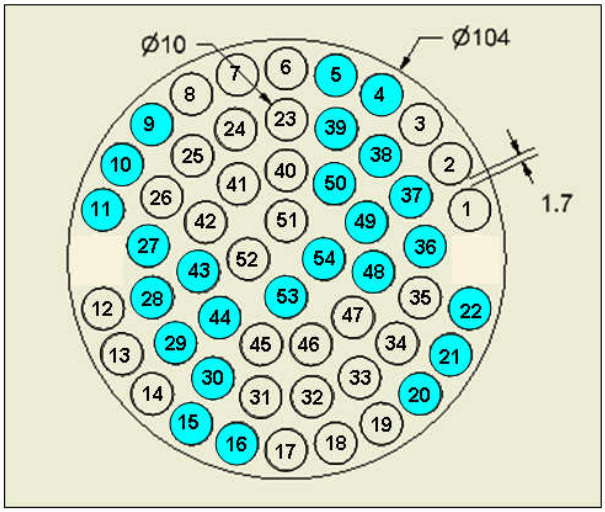

Figura 3.16 - Furos destacados em azul utilizados para o monitoramento de força de avanço e torque

3.6.3 Taxa Monitoramento da Evolução do Desgaste

A evolução da taxa do desgaste foi monitorada através de um estéreo microscópio SZ6145TR da Olympus e sistema de análise de imagens, Image-Pró. O equipamento utilizado no monitoramento é apresentado na Fig. 3.17.

Figura 3.17 - Foto esquemática do aparato experimental utilizado para o monitoramento de desgaste da ferramenta, contendo microscópio, software analisador de imagens e suporte para o posicionamento da ferramenta

As medições de desgaste foram executadas a cada parada do ciclo de furação, totalizando dez medições de nível de desgaste, da ferramenta nova até o último furo do corpo de prova ou colapso da broca, como mostrado em destaque verde no esquema da Fig. 3.18. Foram analisados todos os locais possíveis de ocorrência de desgaste, isto é, flanco, superfície de saída, guias e aresta transversal.

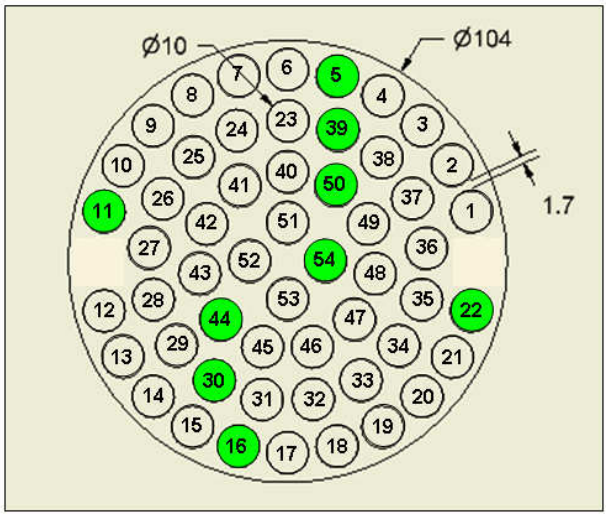

Figura 3.18 - Furos destacados em verde indicam as interrupções para medição dos desgastes das brocas

3.7 Qualidade dos Furos (Rugosidade)

Após os testes de furação foram realizadas medidas e análises de rugosidade nos corpos de prova, utilizando rugosímetro surftronic 3+ da Taylor Hobson. A Figura 3.19 mostra o equipamento utilizado nesta etapa.

Figura 3.19 - Rugosímetro surftronic 3+ da Taylor Hobson em posição de funcionamento

As medições foram realizadas no último furo de cada ciclo, além do primeiro furo realizado nos corpos de prova, como destacado em lilás na Fig. 3.20. Foram monitorados Ra, Rt e Rq. Foram executadas em cada furo quatro medições espaçadas de 90° para então obter-se a média para a análise dos resultados, como mostrado na ampliação do esquema da Fig. 3.20. Foram utilizados cut-offs de 0,80 mm e 2,50 mm devido aos níveis de rugosidades apresentados, recomendados pela norma ISO 4288 (2008), e resolução de 0,02 µm para Ra e Rq e 0,1µm para Rt.

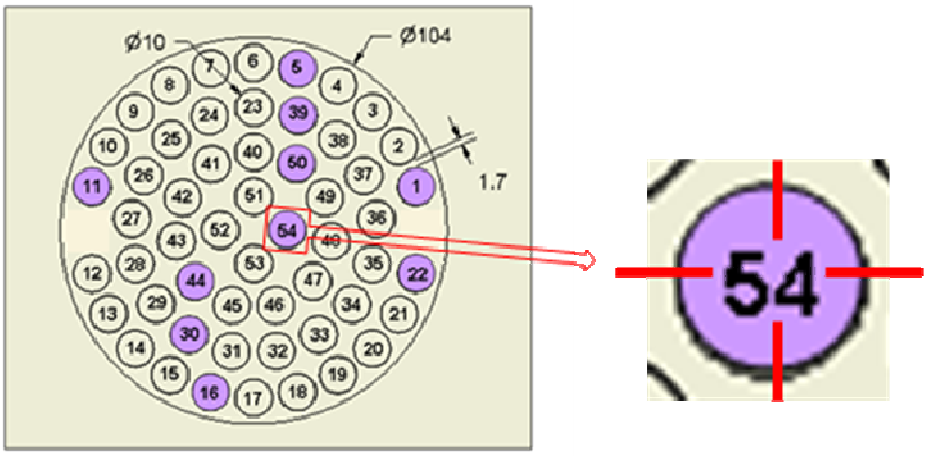

Figura 3.20 - Furos selecionados para medição da rugosidade (destacados em lilás) e ampliação do furo 54 esquematizando os planos de medição para cada furo

3.8 Ensaios de Microdureza Complementares

Foram realizados testes complementares com o intuito de investigar a possibilidade de transformações martensíticas nas paredes dos furos, devido à solicitação mecânica sofrida pelos ADIs durante a furação, através de ensaios de microdureza e metalográficos que serão detalhados nos próximos subitens.

As amostras para a realização dos ensaios complementares foram preparadas a partir de corpos de prova dos ADIs estudados. Para tanto, foram feitos furos de 5, 15 e 25 mm de profundidade nas condições de corte mais severas, ou seja, utilizando velocidade de corte de 140 m/min e avanço de 0,25 mm/volta, nas duas condições de aplicação de fluido, jorro e MQF. Estes corpos de prova foram então cortados com disco de corte abrasivo 01TRE da Struers em equipamento Discotom / Struers, de modo para a obtenção das seções longitudinais dos furos. Posteriormente as amostras foram retificadas com a finalidade de garantir melhor nivelamento necessário aos ensaios. As amostras menores foram embutidas em baquelite para se garantir também menores desvios de planicidade e a

retenção de bordas. Em seguida foram lixadas com lixas de 320, 400, 600, 1200 mesh, e finalmente polidas com pastas diamantadas de 0,6 µm e 0,3 µm

3.8.1 Microdureza

Os ensaios de microdureza Vicker's foram realizados em Microdurômetro Shimatsu, utilizando-se uma carga de HV 0,05 Kg, durante um tempo de 15s. Cada teste compreendeu dez identações com espaçamento entre cada identação de 15µm. Para varrer toda a parede do furo na tentativa de encontrar possíveis transformações martensíticas foram realizados ensaios no fundo da amostra no centro do furo (centro), nas quinas direita (Q.D.) e esquerda (Q.E.), entre o centro e as quinas direita (Meio Q.D.) e esquerda (Meio Q.E.), nas laterais das paredes (T1, T2 e T3) e em um ponto distante da parede do furo como critério de referência (Referência). A Figura 3.21 ilustra estes pontos esquematicamente.

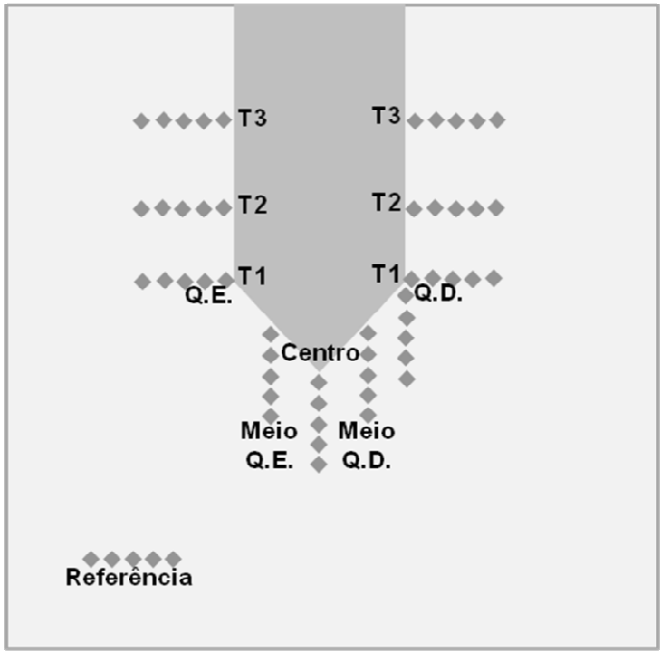

Figura 3.21 - Modelo esquemático de localização das identações realizadas nos ensaios de microdureza

3.8.2 Micrografia

As micrografias foram feitas no Microdurômetro Shimatsu, com microcomputador incorporado, através do software analisador de imagens HMV-AD, com um aumento de 40x. Para tanto, as amostras foram atacadas quimicamente com reativo de Nital a 2%. As micrografias foram tiradas das regiões em que foram realizados os ensaios de microdureza para verificar alguma mudança na estrutura do material analisado. A Figura 3.22 apresenta o equipamento utilizado para os testes de microdureza e micrografias.

Figura 3.22 - Microdurômetro Shimadzu e software HMV-AD

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes às etapas experimentais, seguindo a ordem do fluxograma da metodologia, apresentada no capítulo anterior.

4.1 Etapa 1: Teste de Pressão Constante

A análise dos resultados obtidos nesta etapa foi realizada através de gráficos, tabelas comparativas e análise de significância. A Tabela 4.1 apresenta os valores médios obtidos do percurso de avanço (ou comprimento de penetração) (L_f), durante um tempo de furação de 20 s, para os três materiais investigados.

Tabela 4.1 - Resultados médios de L_f

Material	F_f [Kgf]	Rotação [RPM]	L_f médio [mm]
DI	**7,426**	**1107**	**4,9**
DI	**7,426**	**1925**	**12,15**
DI	**16,34**	**1107**	**10,53**
DI	**16,34**	**1925**	**19,43**
ADI I	**7,426**	**1107**	**3,7**
ADI I	**7,426**	**1925**	**3,85**
ADI I	**16,34**	**1107**	**7,73**
ADI I	**16,34**	**1925**	**5,85**
ADI II	7,426	1107	4,9
ADI II	7,426	1925	10,5
ADI II	16,34	1107	10,33
ADI II	16,34	1925	18,38

Pode-se observar através dos dados obtidos da Tab. 4.1 que o ADI I foi o material que apresentou os menores valores de L_f e consequentemente a pior usinabilidade quando comparado aos outros materiais investigados, em todas as condições de corte utilizadas. Os comprimentos médios de penetração encontrados para o ADI II se aproximaram muito aos valores obtidos para o DI (material de referência).

As Figuras (4.1) e (4.2) apresentam comparações entre os materiais estudados em condições mínimas e máximas de rotação e força de avanço.

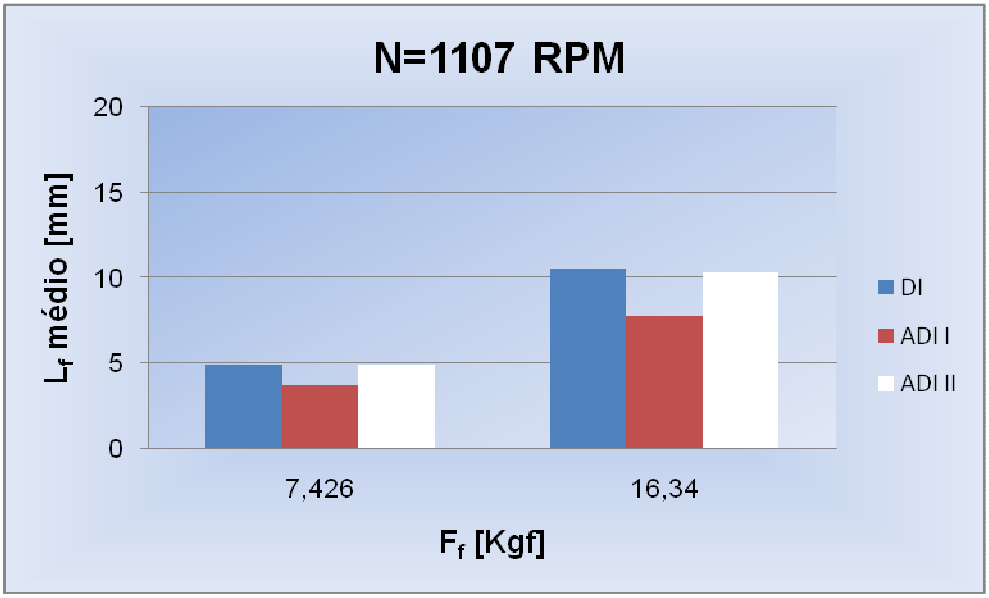

Figura 4.1 - Comprimento médio de penetração (L_f médio) em função da força de avanço (F_f) para a menor rotação

A partir do gráfico da Fig. 4.1, como esperado, observou-se que com o aumento da força de avanço (F_f) o comprimento médio de penetração (L_f) foi maior para todos os materiais. Foi observado também que para ambas as condições de F_f, o DI (263 HB) e o ADI II (207 HB), com resultados semelhantes de L_f, apresentaram os melhores índices de usinabilidade, enquanto que o ADI I (288 HB) mostrou-se como o material mais difícil de usinar. Estes resultados se devem ao grau de dureza dos materiais. Apesar do ADI II apresentar uma dureza inferior ao DI, sua usinabilidade não foi superior a este devido a sua microestrutura contendo ausferrita (austenita de alto carbono e ferrita bainítica).

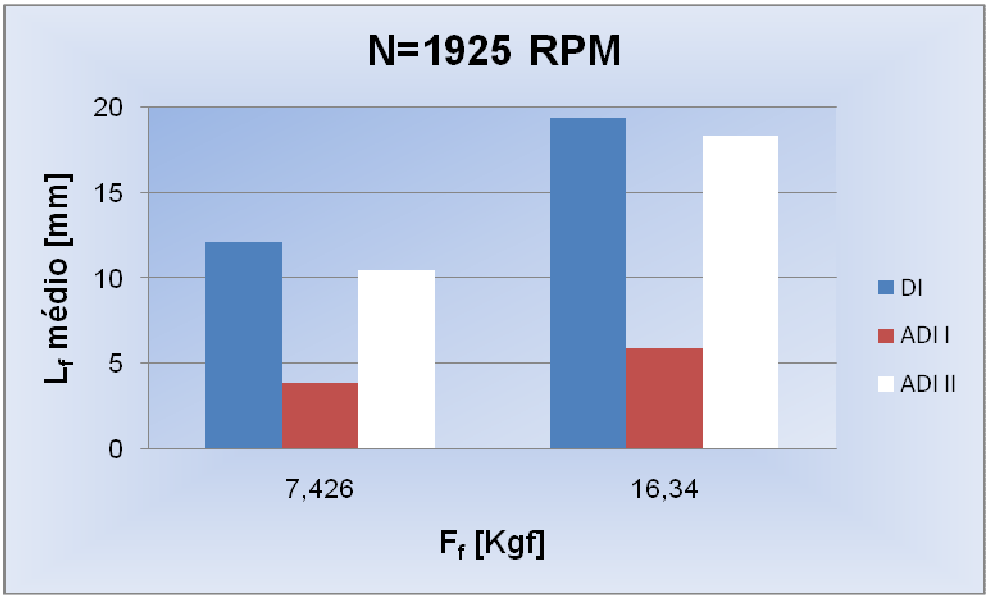

Figura 4.2 - Comprimento médio de Penetração (L_f médio) em função da Força de Avanço (F_f) para a maior rotação

Para a maior rotação empregada, Fig. 4.2, observou-se que a elevação da força de avanço (F_f) também aumentou do comprimento médio de penetração (L_f). No entanto, o ADI I, que apresentou a maior dificuldade de usinagem entre os três materiais, não mostrou um aumento significante de L_f com a elevação de F_f. O material que obteve a maior facilidade na usinagem foi o DI, seguido bem de perto pelo ADI II. Estes resultados, como discutido anteriormente, se devem à diferença de dureza e a microestrutura dos materiais. Quando se elevou a rotação de 1107 para 1925 RPM houve um aumento na velocidade de avanço para a mesma força de penetração e, em conseqüência, um maior percurso de avanço foi alcançado, como esperado. Ao se comparar os resultados das Fig. 4.1 e Fig. 4.2 nota-se que isto ocorreu para todos os materiais, exceto no caso do ADI I na maior força de avanço aplicada, o aumento da rotação reduziu o percurso de avanço médio de 7,73 para 5,85 mm. É importante citar que durante os ensaios com o ADI I nas máximas condições de rotação e força de avanço, observou-se um maior aquecimento da broca e mudança de coloração do cavaco de cinza para azulado. Esta inversão nos resultados de percurso de avanço para o ADI I pode ser devido ao fato de que as condições de corte máximas juntamente com uma microestrutura do material completamente bainítica, que confere ao material elevada dureza, conduziram a uma maior dificuldade na usinagem promovendo a falha da broca que pode ser observada, nas Figs. (4.3) e (4.4). Nestas figuras é possível observar lascamentos da aresta transversal da ferramenta utilizada na furação do ADI I, que se repetiram quando se realizou novo teste.

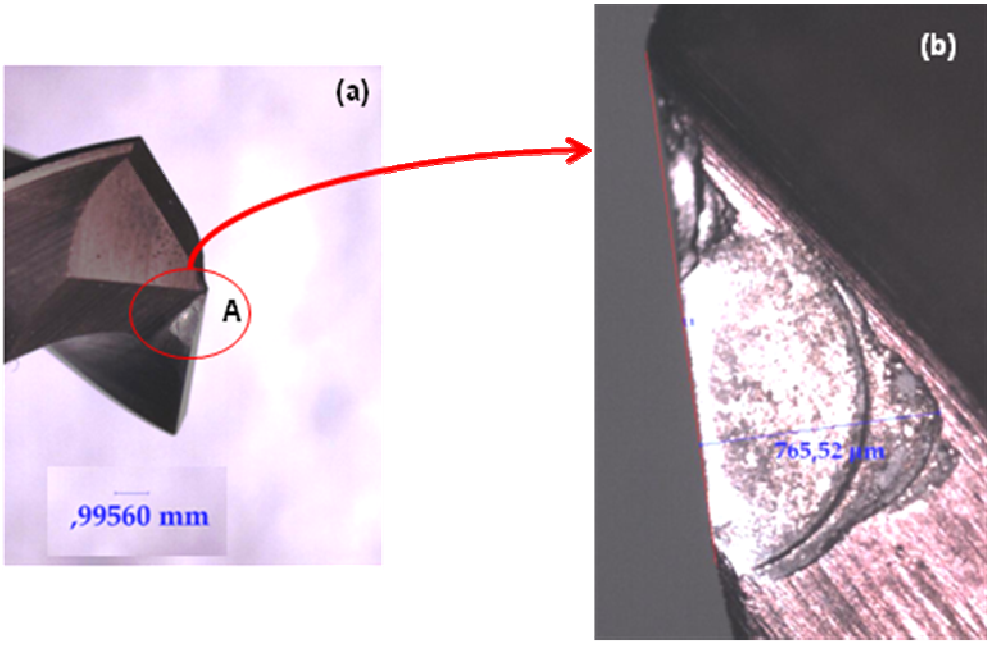

Figura 4.3 - Desgaste da aresta transversal da ferramenta após furar o material ADI I. (a) Broca desgastada, (b) Ampliação da região A da broca desgastada

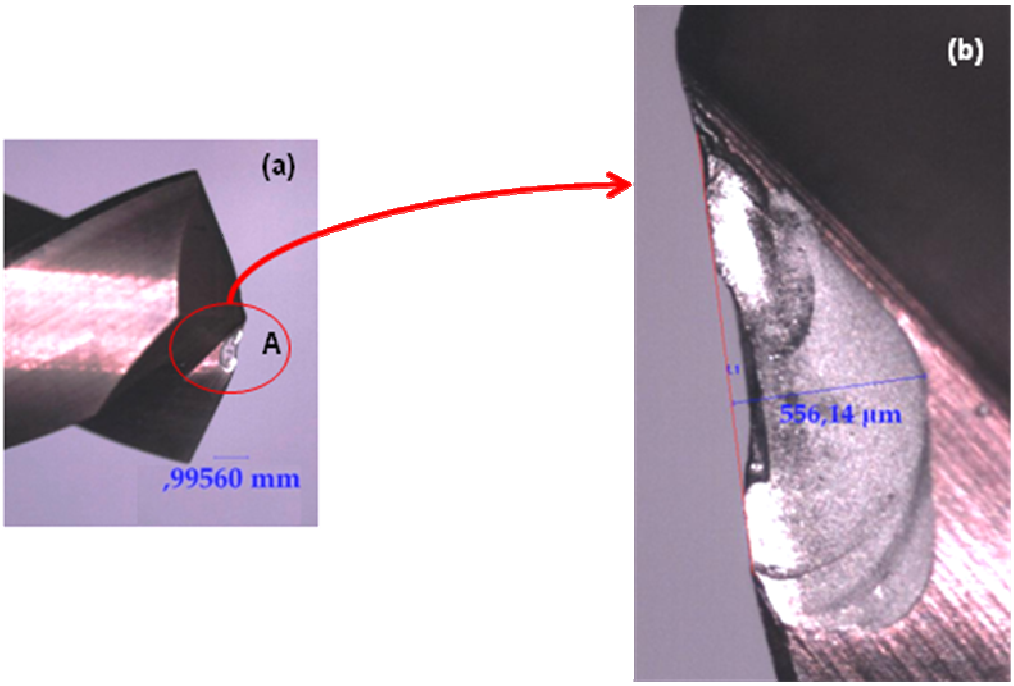

Figura 4.4 - Desgaste da aresta transversal da ferramenta após furar o material ADI I em réplica. (a) Broca desgastada, (b) Ampliação da região A da broca desgastada

Para se ter uma confiabilidade nos resultados obtidos foi feita uma análise de significância, apresentada nas Tabs. (4.2) a (4.4).

Tabela 4.2 - Análise de significância do Planejamento 2^3 comparando ADI I e ADI II

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	8,155000	0,397716	0,002370
Material	5,745000	0,795432	0,018636
F_f [Kgf]	4,835000	0,795432	0,026014
Rotação [RPM]	2,980000	0,795432	0,064438
Material x F_f	1,820000	0,795432	0,149368
Material x Rotação	3,845000	0,795432	0,040232

A Tabela 4.2 mostra, com uma confiabilidade de 95% e 5% de nível de significância (p), que existe diferença significativa entre o ADI I e o ADI II, e que tanto a força de avanço quanto a interação do material com a rotação influenciaram significativamente os resultados. A utilização do material com maior dureza (ADI I, 288 HB) conduziu a um aumento no comprimento de penetração, em média, de aproximadamente 5,75 mm, como pode ser observado na coluna de efeito da Tab. 4.2. Ao aumentar a força de avanço, de 7,426 Kgf para 16,34 Kgf, a resposta sofreu uma elevação média de 4,84 mm e a interação entre o material e a rotação promoveu também um aumento nos valores de L_f, quando se passou de um nível (-1) para um nível (+1).

Tabela 4.3 - Análise de significância do Planejamento 2^3 comparando ADI II e DI

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	11,39000	0,100000	0,005589
Material	0,72500	0,200000	0,171357
F_f [Kgf]	6,55500	0,200000	0,019418
Rotação [RPM]	7,45000	0,200000	0,017086
Material x Ff	-0,10000	0,200000	0,704833
Material x Rotação	0,62500	0,200000	0,197163
Ff x Rotação	1,02500	0,200000	0,122677

A Tabela 4.3, mostra, com uma confiabilidade de 95% e 5% de nível de significância, que não existe diferença significativa entre o ADI II e o DI, e que tanto a força de avanço quanto a rotação influenciaram significativamente os resultados. O aumento de ambas as variáveis conduziram à elevação da resposta, de forma que ao passar de uma rotação de 1107 rpm para 1925 rpm, L_f teve um aumento médio, de aproximadamente 7,45 mm, já o aumento da F_f contribuiu com uma elevação média do percurso médio de penetração, de 6,55 mm. É importante ressaltar que a menor dureza do ADI II (207HB contra 263 HB do

ferro fundido nodular perlítico) não foi suficiente para colocar este material em vantagem com relação ao DI, em termos de usinabilidade, devido ao fato da microestrutura do material ter uma importância significativa fazendo com que o efeito da dureza não seja relevante para o caso destes dois materiais.

Tabela 4.4 - Análise de significância do Planejamento 2^3 comparando ADI I e DI

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	8,517500	0,326999	0,001471
Material	6,470000	0,653997	0,010063
F_f [Kgf]	4,735000	0,653997	0,018548
Rotação [RPM]	3,605000	0,653997	0,031371
Material x F_f	1,720000	0,653997	0,119259
Material x Rotação	4,470000	0,653997	0,020742

A análise de significância apresentada na Tab. 4.4 mostra, com uma confiabilidade de 95% e 5% de nível de significância, que existe diferença significativa entre o ADI I e o DI, e que tanto a força de avanço quanto a rotação e a interação do material com a rotação influenciaram significativamente as respostas, de forma que ao passar de um material com dureza de 263 HB (DI) para um com dureza de 288 HB (ADI I) o comprimento médio de penetração apresentou uma elevação de aproximadamente 6,47 mm, enquanto que ao aumentar a força de avanço a resposta média de L_f mostrou um aumento de 4,74 mm, e com relação a interação do material com a rotação o comprimento médio de penetração (L_f) mostrou uma elevação média de 4,47 mm, quando se passou de um nível (-1) para um nível (+1).

Todos os resultados da análise de significância comprovaram estatisticamente os resultados apresentados anteriormente na Tab. 4.1 e nos gráficos das Figs. 4.1 e 4.2.

4.2 Etapa 2: Ensaios de Furação de Longa Duração

Nesta etapa serão apresentados os resultados referentes ao teste de usinabilidade de longa duração, cujas variáveis monitoradas foram a evolução do desgaste da ferramenta, força de avanço, torque, potência de corte e vibração. Os resultados foram analisados com base em tabelas e gráficos comparativos além de métodos estatísticos utilizados com o intuito de demonstrar a comparação da usinabilidade entre os materiais e quais os efeitos

das variáveis significativas nas respostas dos testes avaliados.

4.2.1 Evolução do Desgaste

Durante a execução dos testes de furação nos materiais estudados foi observado que a evolução do desgaste tanto para o ADI I quanto para o DI apresentaram desgastes de diferentes tipos, sendo observado desgaste de flanco, nas guias, na superfície de saída e lascamento, chegando em alguns casos à falha catastrófica da ferramenta, dependendo das condições de corte que foram utilizadas no teste. As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam fotos da evolução do desgaste do desgaste de flanco, além de mostrarem também os outros tipos de desgaste observados nas ferramentas amostradas, nas condições de corte mais severas para esses dois materiais. Já no caso do ADI II foi observado apenas desgaste de flanco, como mostrado na Fig. 4.7, representada pela condição mais severa de corte em que este ferro fundido foi submetido. Portanto, a análise de comparação da usinabilidade e o estudo dos efeitos das variáveis significativas para esta etapa baseou-se apenas no desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$), como uma padronização para a análise estatística utilizada neste trabalho, considerando como critério de fim de vida o desgaste de flanco máximo após 54 furos, que compreende o números de furos possíveis para um corpo de prova, ou a falha catastrófica da ferramenta, estando esta última condição de acordo com a norma NT METCH 038 da Nordtest (1997), que é uma norma para teste de vida em brocas para furação com aplicação de fluido de corte

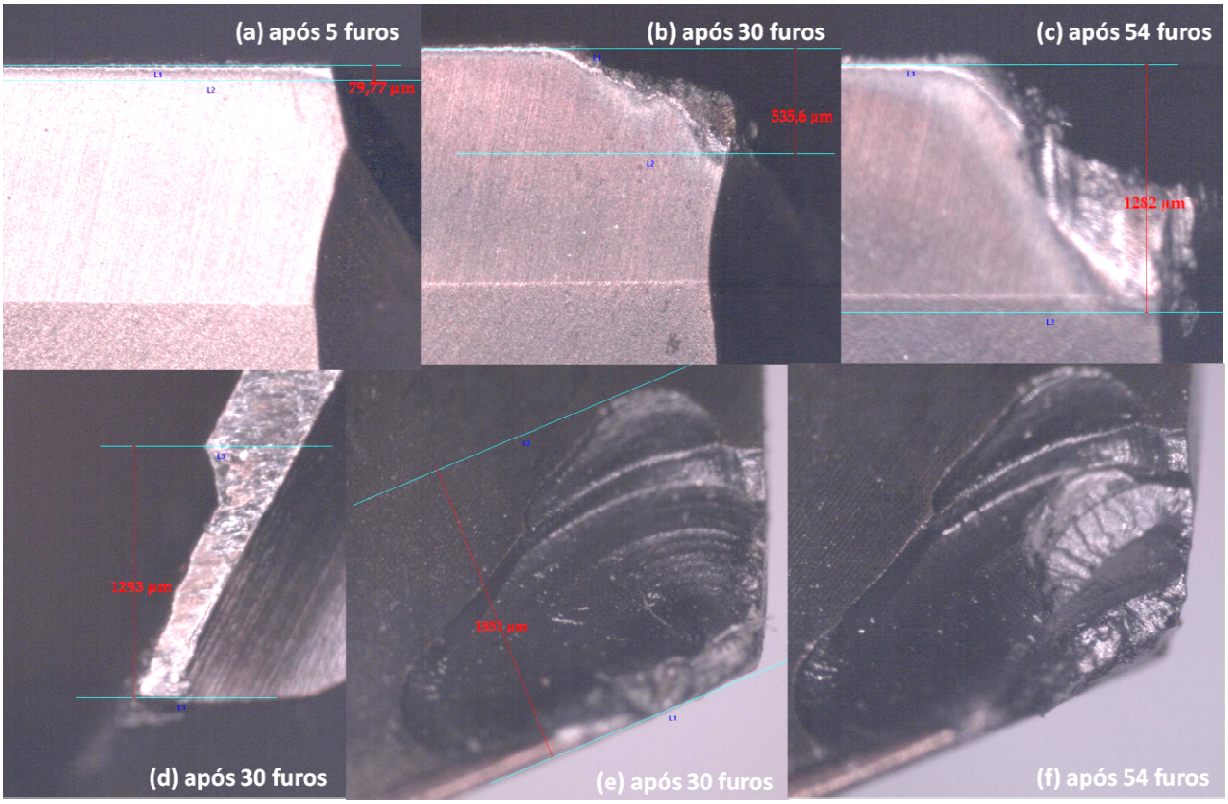

Figura 4.5 - Desgaste da ferramenta na usinagem do DI com Vc = 140 m/min; f = 0,25 mm/volta e aplicação de fluido de corte por jorro com aumento de 45x; (a), (b) e (c) apresentam a evolução do desgaste de flanco onde (a) desgaste de flanco, (b) e (c) desgaste de flanco com lascamento; (d), (e) e (f) mostram os outros tipos de desgastes observados ao longo do teste onde (d) desgaste da guia, (e) e (f) lascamento na superfície de saída

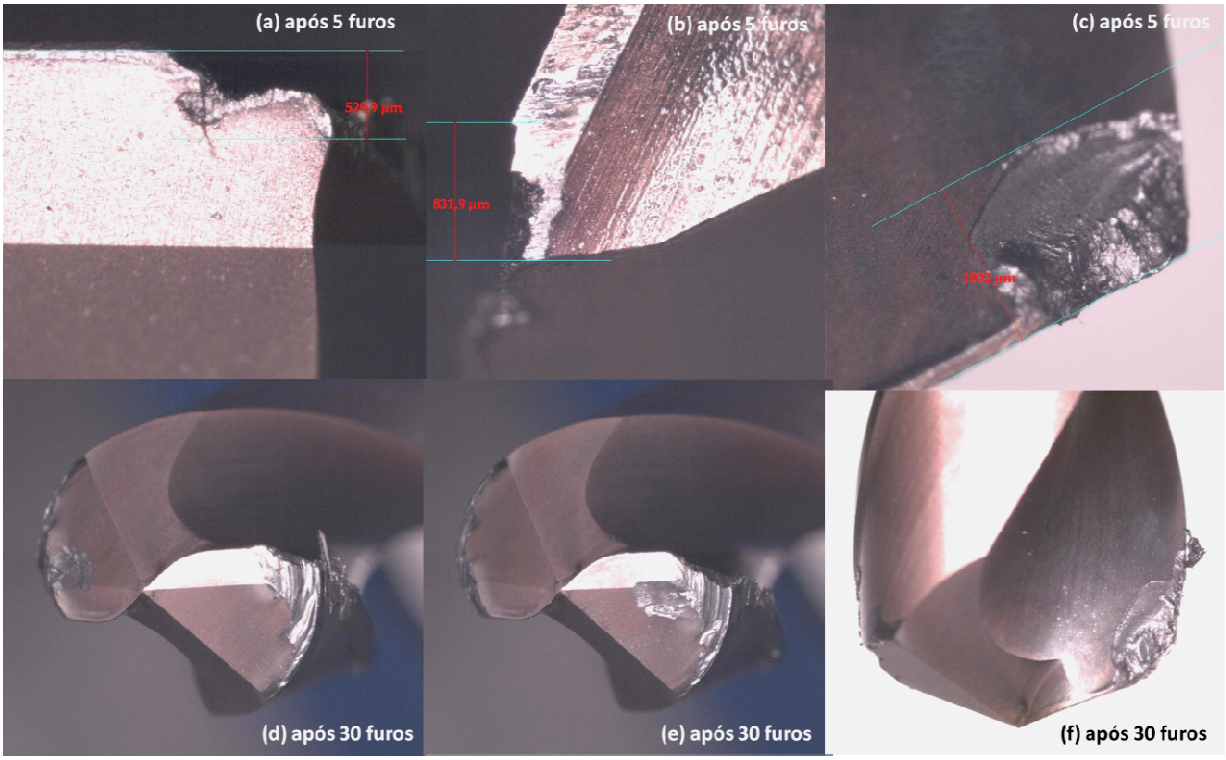

Figura 4.6 - Desgaste da ferramenta na usinagem do ADI I com Vc = 140 m/min; f = 0,25 mm/volta e aplicação de fluido de corte por jorro; (a) desgaste de flanco com lascamento, (b) desgaste na guia, (c) desgaste na superfície de saída (lascamento), (d), (e) e (f) colapso da ferramenta (deformação plástica); (a), (b) e (c) aumento de 45x; (d), (e) e (f) aumento de 10x

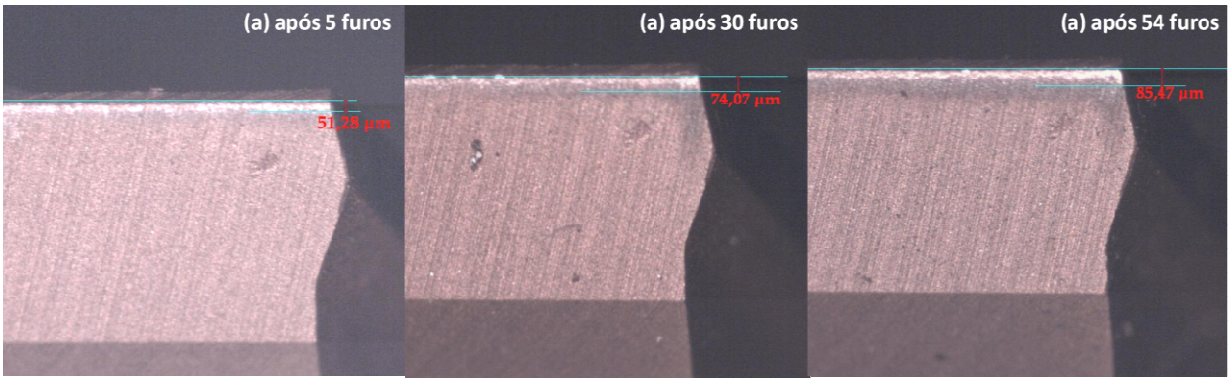

Figura 4.7 - Desgaste da ferramenta na usinagem do ADI II com Vc = 110 m/min; f = 0,15 mm/volta e aplicação de fluido de corte por MQF; aumento de 45x; (a), (b) e (c) evolução do desgaste de flanco

A Figura 4.8 apresenta graficamente as curvas de desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$) na usinagem dos três materiais testados nas diferentes condições de corte, na qual podemos observar que para todos os materiais e condições de corte a evolução do desgaste apresenta curvas características, iniciando por um estágio de desgaste rápido até