

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE AÇO RÁPIDO COM COMPOSIÇÃO QUÍMICA
MODIFICADA PARA A FABRICAÇÃO DE BROCAS HELICOIDAIS DIN 338

Cristiano Devitte

Dissertação para Obtenção do Título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre
2014

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

PPGE3M

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE AÇO RÁPIDO COM COMPOSIÇÃO QUÍMICA
MODIFICADA PARA A FABRICAÇÃO DE BROCAS HELICOIDAIS DIN 338

CRISTIANO DEVITTE

Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência dos Materiais

Porto Alegre
2014

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Fortis Kwietniewski

Banca Examinadora:

Dr. Ricardo Calleguari Jacques

Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha

Prof. Dr. André Ronaldo Froelich

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker
Coordenador do PPGE3M

Dedico a minha família, namorada, amigos e colegas.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Claudino e Marisa, amigos e todos que me incentivaram de alguma maneira a atingir este objetivo.

A minha namorada, Grasiene, que me apoiou em todos os momentos, desde os felizes até os mais apreensivos, com palavras de apoio e de perseverança.

Ao Laboratório de metalurgia física – LAMEF - pelo suporte nos ensaios de caracterização.

Ao Prof. Dr. Calos Fortis Kwietniewski que desde o primeiro momento sempre me apoiou no meu objetivo de conclusão do mestrado e sempre orientou a formação do trabalho.

Aos meus colegas de trabalho, que colaboraram na execução dos ensaios e testes.

A todos que colaboraram de alguma forma na realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	18
1. INTRODUÇÃO.....	20
2. OBJETIVOS	23
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1 Processo de furação	24
3.2 Brocas helicoidais.....	26
3.2.1 Geometria de brocas helicoidais.....	26
3.2.2 Partes de uma broca helicoidal	27
3.3 Grandezas de corte ou parâmetros de usinagem.....	28
3.3.1 Avanço (fn).....	28
3.3.2 Profundidade de corte (ap)	28
3.3.3 Velocidade de corte (Vc).....	29
3.3.4 Largura de usinagem (b).....	29
3.3.5 Espessura de usinagem (h)	29
3.4 Revestimentos de brocas helicoidais	30
3.5 Testes de qualidade de revestimentos.....	34
3.6 Mecanismos de desgaste de ferramentas	38
3.6.1 Abrasão.....	39
3.6.2 Adesão	39
3.6.3 Difusão	40
3.6.4 Oxidação.....	40
3.6.5 Aderência.....	40
3.7 Formas de desgastes em brocas	40
3.7.1 Critérios de fim de vida	42
3.8 Qualidade superficial na furação	42
3.9 Materiais para ferramentas	44
3.10 Aços rápidos	47

3.10.1	Formação dos carbonetos	48
3.10.2	Efeitos dos elementos de liga nos aços rápidos	51
3.11	Tratamento térmico do aço rápido	52
3.11.1	Pré – aquecimento	52
3.11.2	Recozimento	53
3.11.3	Têmpera	54
3.11.4	Revenimento	56
3.11.5	Banho de Sal	59
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	60
4.1	Análise da Composição química das ferramentas e caracterização dos materiais 60	
4.2	Usinagem das ferramentas	60
4.3	Realização dos revestimentos	62
4.4	Ensaio de adesão do revestimento	63
4.5	Realização dos ensaios de furação.....	65
4.6	Medição do desgaste das brocas	67
4.7	Medição da rugosidade dos furos	68
4.8	Medição do diâmetro dos furos	69
4.9	Determinação dos parâmetros de usinagem	69
	70	
4.10	Parâmetros de tratamento térmico das ferramentas	70
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	72
5.1	Composição química dos aços utilizados	72
5.2	Definição do Tratamento térmico das amostras em aço Z2	72
5.3	Tratamento térmico das amostras em aço Z2	78
5.4	Tratamento térmico das amostras em aço AISI M2	78
5.5	Verificação dimensional	81
5.6	Verificação da qualidade da fabricação	81
5.7	Ensaio de furação	81
5.7.1	Desgaste da ferramenta.....	82
5.7.2	Qualidade dos furos – Rugosidade superficial	90
5.7.3	Qualidade dos furos - Diâmetro dos furos.....	95
5.7.4	Análise dos modos de falha das ferramentas com TiN	99
5.7.5	Análise geral dos resultados	107
6.	CONCLUSÕES	111
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	113
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Tipos de processo de furação com ferramentas de geometria definida pela DIN 8589 (Adaptado de KONIG et al. 1997).....	25
Figura 3.2	Formas de se obter furos (Adaptado de STOETERAU 2007).....	26
Figura 3.3	Gumes de uma broca helicoidal (adaptado de MARQUES 2012).	27
Figura 3.4	Largura e profundidade de corte (ap) (Adaptado de DINIZ et al. 2008).	28
Figura 3.5	Esquema do processo de vaporização á vácuo (Adaptado de STOETERAU 2007).	31
Figura 3.6	Processo de sputtering (Adaptado de STOETERAU 2007).	32
Figura 3.7	Processo Ion plating (Adaptado de STOETERAU 2007).	33
Figura 3.8	Classes da qualidade de adesão segundo VDI 3198 (Adaptado de VDI 3198 1992).	35
Figura 3.9	Esquema de forças atuando sobre o incisora durante o teste de riscamento (Adaptado de SOUSA 2004).	36
Figura 3.10	A) Falha coesiva, onde o substrato não fica exposto. B) Falha adesiva, onde o substrato fica exposto. Ambas ocorridas sobre um revestimento PVD (Adaptado de ANTUNES 2006).....	36
Figura 3.11	Modos de deslocamento durante teste de riscamento (Adaptado DIN1071-3:2005).	37
Figura 3.12	Curva característica do ensaio de nanodureza (Adaptado de TEDESCO 2007). 38	
Figura 3.13	Diagrama de distribuição dos mecanismos de desgaste (Adaptado de KONIG et al. 1997).	39
Figura 3.14	Tipos de desgaste por abrasão em uma broca (Adaptado de BORK 1995).	41
Figura 3.15	Desgaste de flanco em brocas helicoidais (Adaptado de SCHROETER et al. 1999).	42

Figura 3.16	Conceitos básicos para verificação de rugosidade superficial (Adaptado de CASTILLO 2005).....	44
Figura 3.17	Tabela de tolerâncias do processo de usinagem (Adaptado de MARQUES 2012).	44
Figura 3.18	Materiais utilizados para ferramentas de corte (Adaptado de DORMER 2008). 45	
Figura 3.19	AISI M2: Microestruturas. A) Nital 10%, 1000x. 22,33mm (0,875in.) diâmetro da barra, austenitizado a 1165°C (2125°F) e resfriado em óleo. Partículas de carbonetos esferoidais em martensita não revenida. Tamanho de grão ASTM 17. (b) Nital 10%, 1000x. Mesmo aço que (a), austenitizada a 1210 °C (2210°F). Tamanho de grão aumentado para 12 devido a alta temperatura de austenitização. Nital 10%, 1000x. Mesmo aço que (a), mas austenitizado a 1240°C (2260°F), resultado do incremento do tamanho de grão para 8 (Adaptado de CHANDLER 1994).....	55
Figura 3.20	Diagrama TTT para o aço rápido AISI M2 (Adaptado de HOYLE 1988).....	56
Figura 3.21	Curva de revenimento do aço AISI M2 (Adaptado de SILVA 2010).	57
Figura 3.22	Volume, em porcentagem, do carboneto total que existe como carboneto de vanádio em aços rápidos nas condições recozidos e temperados (Adaptado de CHIAVERINI 1990).....	58
Figura 3.23	Ciclo de tratamento térmico de aços rápidos (Adaptado de HOYLE 1988).....	58
Figura 3.24	A) Peça em fase final de têmpera. B) Peça sendo movimentada (Adaptado de YOSHIDA 2007).	59
Figura 4.1	Célula de produção para a usinagem das brocas de aço rápido.	61
Figura 4.2	Suporte para verificação dimensional de brocas.....	62
Figura 4.3	a) Paquímetro utilizado na verificação dimensional. b) Micrômetro utilizado na verificação dimensional.	62
Figura 4.4	Corpos de prova para ensaio de adesão dos revestimentos.....	63
Figura 4.5	Durômetro Rockwell para realização do teste de indentação.	64
Figura 4.6	Tribômetro utilizado para teste de riscamento das amostras.	64
Figura 4.7	Microdurômetro Vickers utilizado nos ensaios de dureza.	65
Figura 4.8	Centro de usinagem vertical utilizado nos ensaios de furação.	65
Figura 4.9	Equipamento para teste de dureza Brinell.	66
Figura 4.10	Plano de furação realizado nos ensaios de furação.....	66

Figura 4.11	Imagem para a verificação do desgaste de flanco das amostras nos testes de furação.....	67
Figura 4.12	Microscópio óptico utilizado nas verificações metalográficas.	68
Figura 4.13	Rugosímetro linear digital.....	68
Figura 4.14	a) Visão geral dos fornos de banho de sal utilizados nos tratamentos térmicos. b) Visão geral dos fornos de revenimento utilizados nos tratamentos térmicos. 71	
Figura 5.1	Corte transversal do aço Z2 na condição recozido. Aumento de 100x. Ataque Nital 10%. Tempo de ataque 60s.	74
Figura 5.2	Corte longitudinal do aço Z2 na condição de recozido. Aumento de 100x. Ataque Nital 10%. Tempo de ataque 60s.....	74
Figura 5.3	Material Z2 temperado nas condições de tratamento térmico 1. Aumento 1000x. Ataque de Nital 4%.....	75
Figura 5.4	Material Z2 temperado nas condições de tratamento térmico 2. Aumento 1000x. Ataque Nital 4%.....	75
Figura 5.5	Material Z2 temperado na condição de tratamento térmico 3. Aumento 100x. Ataque Nital 4%.....	76
Figura 5.6	Material Z2 temperado e revenido três vezes nas condição de tratamento térmico 1. Aumento 1000x. Ataque Nital 4%.....	76
Figura 5.7	Material Z2 temperado e revenido três vezes na condição de tratamento térmico 2. Aumento 1000x. Ataque Nital 4%.....	77
Figura 5.8	Material Z2 temperado e revenido três vezes na condição de tratamento térmico 3. Aumento 1000x. Ataque Nital 4%.....	77
Figura 5.9	Material AISI M2 como recebido em corte transversal. Aumento 100x. Ataque Nital 10%. Tempo de ataque 60s.	79
Figura 5.10	Material AISI M2 como recebido em corte longitudinal. Aumento 100x. Ataque Nital 10%. Tempo de ataque 60s.....	79
Figura 5.11	Tamanho de grão de aço AISI M2 temperado. Aumento 1000x. Ataque Nital 4%. Tempo de ataque 60s.	80
Figura 5.12	Microestrutura do AISI M2 temperado e revenido. Aumento 1000x. Ataque Nital 4%. Tempo de ataque 7s.	80
Figura 5.13	Desgaste de flanco $V_{b\text{méd}}\text{é}$ para as condições com $V_c=20\text{m/min}$ e $f_n=0,075\text{mm/rot.}$	82

Figura 5.14	Número de furos realizados com $V_{b\text{méd}}=0,2\text{mm}$ e $V_c=20\text{m/min}$ e $f_n=0,075\text{mm/rot.}$	83
Figura 5.15	Desgaste de flanco $V_{b\text{méd}}$ para as condições com $V_c=20\text{m/min}$ e $f_n=0,110\text{mm/rot.}$	84
Figura 5.16	Número de furos realizados com $V_{b\text{méd}}=0,2\text{mm}$ e $V_c=20\text{m/min}$ e $f_n=0,110\text{mm/rot.}$	85
Figura 5.17	Desgaste de flanco $V_{b\text{méd}}$ para as condições com $V_c=30\text{m/min}$ e $f_n=0,075\text{mm/rot.}$	86
Figura 5.18	Número de furos realizados com $V_{b\text{méd}}=0,2\text{mm}$ e $V_c=30\text{m/min}$ e $f_n=0,075\text{mm/rot.}$	87
Figura 5.19	Desgaste de flanco $V_{b\text{méd}}$ para as condições com $V_c=30\text{m/min}$ e $f_n=0,110\text{mm/rot.}$	88
Figura 5.20	Número de furos realizados com $V_{b\text{méd}}=0,2\text{mm}$ e $V_c=30\text{m/min}$ e $f_n=0,110\text{mm/rot.}$	89
Figura 5.21	Rugosidade R_a para as condições de teste 1, 5, 9 e 13 com $V_c=20\text{m/min}$ e $f_n=0,075\text{mm/rot.}$	91
Figura 5.22	Rugosidade R_a para as condições de teste 2, 6, 10 e 14 com $V_c=20\text{m/min}$ e $f_n=0,110\text{mm/rot.}$	92
Figura 5.23	Rugosidade R_a para as condições de teste 3, 7, 11 e 15 com $V_c=30\text{m/min}$ e $f_n=0,075\text{mm/rot.}$	93
Figura 5.24	Rugosidade R_a para as condições de teste 4, 8, 12 e 16 com $V_c=30\text{m/min}$ e $f_n=0,110\text{mm/rot.}$	94
Figura 5.25	Diâmetro de furação em função do comprimento usinado nas condições de teste 4, 8, 12 e 16 com $V_c=30\text{m/min}$ e $f_n=0,110\text{mm/rot.}$	95
Figura 5.26	Diâmetro de furação em função do comprimento usinado nas condições de teste 2, 6, 10 e 14 com $V_c=20\text{m/min}$ e $f_n=0,110\text{mm/rot.}$	97
Figura 5.27	Diâmetro de furação em função do comprimento usinado nas condições de teste 1, 5, 9 e 13 com $V_c=20\text{m/min}$ e $f_n=0,075\text{mm/rot.}$	98
Figura 5.28	Diâmetro de furação em função do comprimento usinado nas condições de teste 3, 7, 11 e 15 com $V_c=30\text{m/min}$ e $f_n=0,075\text{mm/rot.}$	99
Figura 5.29	Verificação do desgaste por abrasão do AISI M2 com TiN (a) e verificação do desgaste por adesão (b).	100

Figura 5.30	Brocas com substrato de Z2, antes do teste de furação (a) e alteração microestrutural da aresta de corte ocorrida após o teste de furação (b) no aço Z2.	101
Figura 5.31	(a) Ensaio de adesão de TiN sobre o substrato de Z2 e (b) Ensaio de adesão de TiN sobre o substrato de AISI M2.	103
Figura 5.32	Trilhas de riscamento observadas por MEV, com aumento de 100x, para o TiN aplicado sobre o AISI M2.	104
Figura 5.33	Trilhas de riscamento com aumento de 500x observadas pelo MEV para o TiN sobre o AISI M2, detalhando a parte final dos riscos.	104
Figura 5.34	Trilhas de riscamento observada por MEV, com aumento de 100x, para o TiN aplicado sobre o Z2.	105
Figura 5.35	Trilhas de riscamento com aumento de 500x observadas pelo MEV, para o TiN sobre o Z2, detalhando a parte final dos riscos.	105
Figura 5.36	Comparativo da quantidade de furos entre as brocas em AISI M2 e Z2 para todos os parâmetros de corte.	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Classificação conforme a norma ISO para as classes de metal duro (Adaptado de ISO 513:2004)	46
Tabela 3.2	Classificação de aços ferramentas conforme aplicação (Adaptado de JESUS 2004).....	48
Tabela 3.3	Composição química de aços rápidos (Adaptado de ASTM A 600 1993).....	49
Tabela 3.4	Designação para o aço AISI M2 para diversos países (Adaptado de JESUS 2004).....	50
Tabela 3.5	Classificação dos aços rápidos em função dos elementos de liga - Verificação do tungstênio equivalente (Adaptado de ARAÚJO 1993)	51
Tabela 3.6	Temperaturas, propriedades e meios de resfriamento para aços rápidos (Adaptado de CHIAVERINI 1990).....	53
Tabela 3.7	Influência da temperatura de austenitização no tamanho de grão do aço rápido recozido (Adaptado de HOYLE 1988).....	54
Tabela 4.1	Especificação dimensional das brocas usinadas.....	61
Tabela 4.2	Planejamento para a execução das amostras.	70
Tabela 4.3	Parâmetros utilizados na execução dos ensaios de furação.....	70
Tabela 4.4	Parâmetros de tratamento térmico utilizados para o pré-teste de tratamento térmico do aço Z2.....	71
Tabela 4.5	Sais utilizados no tratamento térmico.....	71
Tabela 5.1	Composição química das amostras de Z2 e AISI M2.	72
Tabela 5.2	Ensaio de dureza realizados no pré-teste.....	73
Tabela 5.3	Valores de dureza em HRC dos pinos para testes de furação.	78
Tabela 5.4	Condições de tratamento térmico utilizado para o aço AISI M2.	78
Tabela 5.5	Valores de dureza obtidos para os pinos em aço AISI M2.....	81

Tabela 5.6	Mecanismos de desgaste, para cada condição, atribuídos às peças com revestimento.	100
Tabela 5.7	Verificação da força de aderência das amostras com revestimento de TiN.	103
Tabela 5.8	Análise geral dos resultados para os testes realizados, divididos pelos parâmetros de corte.....	108

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

α	Ângulo de incidência;
AISI	American Iron and Steel Institute;
AlCrN	Nitreto de cromo alumínio;
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio;
a _p	Profundidade de corte;
ASM	American Society of Materials;
ASTM	American Society for Testing Materials;
β	Ângulo de cunha;
B	Largura de usinagem;
Cr	Cromo;
Co	Cobalto;
CBN	Nitreto cúbico de boro;
Cermet	Carbetos;
CAM	Computer aided manufacturing;
D	Diâmetro da ferramenta;
DIN	Deutsches Institut für Normung;
EUA	Estados Unidos da América;
f	Avanço;
h	Espessura de usinagem;
H	Classificação para classe de metal duro;
HB	Medição de dureza em Brinell;
HV	Medição de dureza em Vickers;
HRC	Medição de dureza em Rockwell C;
HSS	High-speed steel;
ISO	International Organization for Standardization;

K	Classificação para classe de metal duro;
KT	Profundidade da cratera;
Kgf	Kilograma-força;
M	Classificação para classe de metal duro;
MQF	Mínima quantidade de fluido;
mm	Milímetro;
Mo	Molibdênio;
μm	Micrômetro;
M ₆ C	Carboneto presente nos aços rápidos;
MC	Carboneto presente nos aços rápidos;
M ₂ C	Carboneto presente nos aços rápidos;
M ₂₃ C ₆	Carboneto presente nos aços rápidos;
M _i	Início da formação martensítica;
M _f	Final da transformação martensítica;
MIL-S	Military Standard;
N	Rotações por minuto;
Nb	Nióbio;
Ni	Níquel;
N	Classificação para classe de metal duro;
P	Classificação para classe de metal duro;
PVD	Physical Vapor Deposition;
PCD	Diamante policristalino;
PCBN	Nitreto cúbico de boro policristalino;
Ra	Unidade de medição de rugosidade;
Ry	Unidade de medição de rugosidade;
Rt	Unidade de medição de rugosidade;
Rz	Unidade de medição de rugosidade;
rε	Raio da ponta;
S	Classificação para classe de metal duro;
SEP 1615	Norma para distribuição de carbonetos em aços rápidos;
SAE	Society of Automotive Engineers;
σ	Ângulo da ponta;
θ	Ângulo do gume transversal;

TiC	Carboneto de Titânio;
TiCN	Carbonitreto de Titânio;
TiAlN	Nitreto de Titânio-alumínio;
TiN	Nitreto de Titânio;
V	Vanádio;
Vc	Velocidade de corte;
VDI	Verein Deutscher Ingenieure;
VB _{máx}	Desgaste de flanco máximo;
VB _{médio}	Desgaste de flanco médio;
VCS	Modelo da CNC utilizada para os testes de furação;
W	Tungstênio;
γ	Ângulo de saída;

RESUMO

O presente trabalho buscou verificar a viabilidade técnica de utilização de aço Z2 para fabricação de brocas DIN 338, com e sem revestimento de TiN produzidos por PVD quando comparado com o desempenho em furação de brocas de AISI M2 revestidas pelo mesmo filme. A caracterização do material foi realizada em conformidade com a norma SEP 1615 e a identificação do tamanho de grão foi realizada pelo método Snyder-Graff. Nos ensaios de furação, foi utilizada um centro de usinagem CNC MAZAK VCS 430A. A aderência dos filmes finos de TiN foi verificada pelo teste de indentação VDI 3198. Para o material Z2, aço alternativo que foi objeto de estudo neste trabalho, foi necessária a realização de um pré-teste para a definição dos parâmetros de tratamento térmico. As variáveis significativas para os ensaios foram o material do substrato (Z2 e AISI M2), o revestimento da ferramenta (com e sem), a velocidade de corte (20 m/min e 30 m/min) e o avanço de corte (0,110 mm/rot e 0,075 mm/rot). As variáveis de resposta analisadas foram o desgaste da ferramenta, o número de furos produzidos, o diâmetro de furação e a rugosidade superficial dos furos. Em algumas situações, o Z2 pode ser considerado como substituto ao AISI M2, como na furação em baixas velocidades de corte, quando o desgaste das ferramentas em Z2 foi menor. Em relação à rugosidade dos furos com as brocas sem o revestimento de TiN, o Z2 pode ser considerado equivalente ao AISI M2. Já quanto ao diâmetro de furação, somente a condição de Z2 com TiN pode ser considerada equivalente ao AISI M2. Porém, na análise geral dos resultados, foi possível constatar que o material Z2 não pode ser recomendado como substituto para o AISI M2 para a fabricação de brocas helicoidais de aço rápido. Isso ocorre porque esse aço normalmente é empregado em uma ampla faixa de parâmetros de usinagem, desde baixas até altas velocidades e avanços de corte, sendo que no conjunto global dos resultados foi constatado o melhor desempenho do AISI M2 quando comparado ao Z2, tanto em baixas quanto em altas velocidades de corte.

ABSTRACT

The present study sought to verify the technical feasibility of using Z2 steel for the manufacture of drills DIN 338, with and without TiN coating produced by PVD compared with performance in drilling drills AISI M2 coated with the same film. The characterization of the material was carried out in accordance with standard SEP 1615, and identifying the grain size was performed by Snyder-Graff method. In the drilling tests, a machining center CNC MAZAK VCS 430A was used. The adherence of TiN thin films was measured by indentation test VDI 3198. For Z2 material, alternate steel that was the object of the present study, it was necessary to perform a pre-test to define the parameters of heat treatment. The significant variables were the tests for the material of the substrate (Z2 and AISI M2), the coating of the tool (with or without), cutting speed (20 m / min and 30 m / min) and the cutting feed (0.110 mm / rev and 0.075 mm / rev). The response variables analyzed were the tool wear, the number of holes, diameter drilling and the surface roughness of the holes. In some situations, Z2 can be considered as a substitute for AISI M2, in drilling at low cutting speed, when the tool wear was smaller in Z2. Regarding the roughness of the holes with or without TiN coating, Z2 can be considered equivalent to AISI M2. As for the bore diameter, only the condition of Z2 with TiN can be considered equivalent to AISI M2. However, the overall analysis of results, it was found that the Z2 material may not be recommended as a substitute for AISI M2 to manufacture high-speed steel drills. This is because this steel is normally used in a wide range of machining parameters, from low to high cutting speeds and cutting feeds, and in the overall set of results was found the best performance when compared AISI M2 to Z2, with low cutting speeds or high cutting speeds.

1. INTRODUÇÃO

O processo de remoção de material por usinagem dentro da indústria metal mecânica representa 15% a 20% do nível de transformação do aço. Dentro dos processos de usinagem, existe uma representatividade muito grande em relação ao processo de furação, por esse representar cerca de 30%, principalmente com relação às furações curtas, com até 2,5 vezes o diâmetro da broca (STEMMER 2007; MARTINS 2008). Para ter um desempenho satisfatório e economicamente viável, utiliza-se aços rápidos capazes de manter suas propriedades em altas temperaturas.

Em um estudo divulgado pela ASM (AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS), foi identificado que no período de 1950-1960, nos EUA, os aços da classe M eram responsáveis por 70% dos aços rápidos consumidos. Atualmente, representam em torno de 95% dos aços rápidos produzidos nos EUA. Entre as importantes características dos aços rápidos, encontra-se a capacidade de manter a dureza a elevadas temperaturas, na ordem de 550°C (SILVA 2010). A fim de melhorar ainda mais o desempenho e proporcionar maior vida útil, pode-se utilizar revestimentos protetores para as brocas.

Os revestimentos produzidos por PVD (*Physical Vapor Deposition*) são aplicados em brocas de aço rápido com espessuras de 3 a 8 μm , na faixa de temperaturas entre 150°C e 550°C, sendo muito utilizados em ferramentas de corte. São estes revestimentos superficiais que aumentam a dureza das peças, bem como a resistência ao desgaste abrasivo (TASSI 2010).

A investigação da possibilidade de utilização do aço Z2, como alternativa para a substituição ao aço AISI M2 no processo de fabricação de brocas, deve ser abordada pelos aspectos econômicos e técnicos. O seu uso, pode contribuir de várias formas para a diminuição de custos de fabricação, em relação ao seu tratamento térmico; ao seu

processamento primário, devido ao menor percentual de elementos de liga; na fabricação, pela sua usinabilidade, que pode ser facilitada, nas operações de pós-furação, sendo necessárias menos etapas para adequação do acabamento, como também na capacidade de adesão da camada PVD.

Em relação a sua composição química, o Z2 possui uma quantidade de elementos de liga inferior em relação ao tungstênio (2,97%), ao molibdênio (3,15%) e ao vanádio (1,46%), em comparação ao AISI M2, sendo superior apenas em relação ao percentual de cromo (4,38%).

Outro benefício, em termos econômicos, está relacionado ao processo de compra, sendo realizada a valores inferiores ao praticado em relação ao AISI M2, que, devido a sua menor quantidade de elementos de liga, em torno da metade da quantidade de tungstênio e 50 % menor em relação ao molibdênio, gera menores valores para o seu processamento primário, impactando diretamente no valor para a aquisição.

Um dos principais fatores que podem contribuir para a utilização do Z2, pode estar relacionada ao seu tratamento térmico, devido a possibilidade de utilização de menores temperaturas de processamento em comparação ao AISI M2, devido ao seu menor volume de elementos de liga, demandando assim menores volumes de energia elétrica para a realização do processo. Como os materiais estão sendo considerados no processo de fabricação de brocas, a sua usinabilidade também pode ser facilitada, agilizando o processo em termos de parâmetros produtivos; assim como em relação as falhas com o processo de retífica.

Mais uma característica positiva que pode ser gerada pela sua utilização, está relacionada ao processo posterior ao de furação. Em algumas situações, é necessária a realização da operação de alargamento, para ajuste da rugosidade superficial e do diâmetro de furação. Contudo, se a utilização de uma ferramenta que contribua em termos de redução da rugosidade e menores desvios em relação ao diâmetro de furação, em alguns casos, pode até ser desnecessária a utilização de processamento posterior, diminuindo operações e consequentemente os custos de fabricação no acabamento das peças.

A relevância deste trabalho está na relação dos aços utilizados, após o tratamento térmico, combinados com filmes finos depositados via PVD, o que melhora o seu desempenho no processo de furação. Porém, quando for utilizado um aço com diferente composição química, o desempenho com este tipo de material, seja com ou sem revestimento,

ainda não está elucidado, bem como a influência dos parâmetros de corte, a sua interação com o desempenho das ferramentas e os parâmetros de respostas encontrados, em termos de número de furos realizados e da qualidade superficial destes furos.

Primeiramente, foi realizada uma recapitulação a respeito do processo de furação bem como das ferramentas e materiais utilizadas para sua fabricação. Após, são apresentados os parâmetros de monitoramento das peças trabalhadas e finalmente serão avaliados os resultados, em termos de curva de desgaste, quantidade e acabamento de furos para os parâmetros definidos e as conclusões obtidas com os ensaios realizados.

2. OBJETIVOS

- Verificar a viabilidade técnica de utilização de um aço alternativo para a fabricação de brocas helicoidais DIN 338, analisando seu desempenho em furação e a qualidade dos furos obtidos, com e sem revestimentos de TiN, comparando os resultados com aqueles obtidos para o AISI M2;
- Mostrar a influência do substrato na adesão do revestimento utilizado e em relação ao desgaste das brocas, identificando o seu desempenho na furação de aço SAE 1045 amplamente utilizado na indústria;
- Gerar informações a respeito da utilização do aço Z2, considerado neste trabalho, podendo tornar mais econômica a fabricação de brocas em escala industrial.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processo de furação

O processo de furação pode ser considerado, devido a maioria das peças possuírem ao menos um furo, como um dos processos de remoção de material mais utilizados na indústria metal mecânica, sendo que as peças obtidas por este processo normalmente são furadas em cheio e necessitam um processo de alargamento. Neste contexto, a furação com brocas pode ser incluída no processo de fabricação com gume de geometria definida e, juntamente com o torneamento, este processo representa 30% das operações de usinagem e 75% do volume de material removido no processo (DINIZ, et al. 2008; SMITH 2008; CASTILLO 2005).

De acordo com a norma alemã DIN 8589 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 2003) a furação é definida como um processo de usinagem com movimento de corte circular, ou seja, com movimento rotativo principal. A ferramenta possui movimento de avanço apenas na direção do seu eixo de rotação, que mantém sua posição em relação à ferramenta e à peça (KÖNIG e KLOCKE 1997).

A norma DIN 338 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 1978) é o guia para caracterização geométrica que se relaciona com a broca de canal helicoidal com haste cilíndrica, sendo que os parâmetros de corte são relacionados com o material da ferramenta, da peça a ser usinada e a outros fatores. Alguns agravantes são incluídos no processo de furação com brocas helicoidais, principalmente em função da variação da velocidade de corte, que é zero no centro e máxima na periferia da ferramenta (KONIG et al. 1997; YOUSSEF, et al. 2008).

De acordo com Ferrarresi (1970), a classificação do processo de furação pode ser observado na Figura 3.1 e subdividida como descrito:

- Furação em cheio: Processo onde se obtém um furo cilíndrico e todo o material do furo é removido em forma de cavaco;
- Furo com rebaixo: Processo onde se tem dois furos, com diâmetros diferentes e com profundidades diferentes;
- Furo escareado: Processo onde se tem dois furos, com diâmetros diferentes e um deles escareado (YOUSSEF et al. 2008);
- Furo cego: Processo aonde uma parte do material não é removido, ou seja, o furo não é passante;
- Trepanação: Processo onde apenas parte do material é reduzido a cavaco, permanecendo o núcleo maciço (SANTOS 2008).

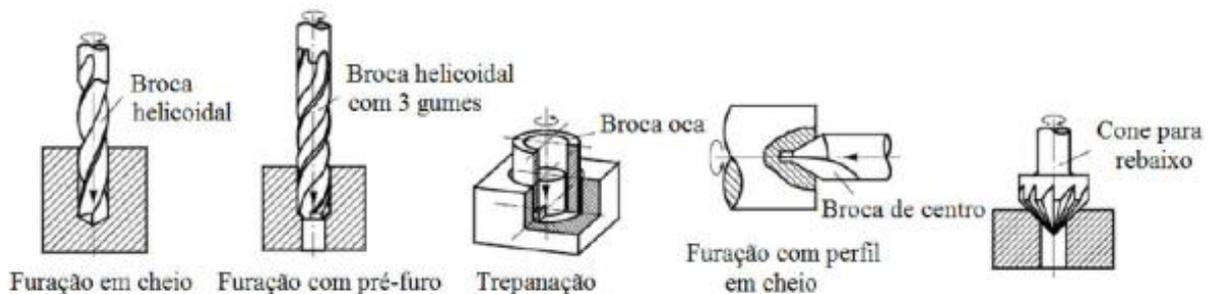


Figura 3.1 Tipos de processo de furação com ferramentas de geometria definida pela DIN 8589 (Adaptado de KONIG et al. 1997).

Para a obtenção de furos em processos de usinagem também são indicados alguns processos não convencionais, como mostrado na Figura 3.2, dentre eles a eletroerosão, corte por remoção química, feixes de energia e conformação por punção (STOETERAU 2007).

Em algumas situações, para atingir a precisão dimensional requerida, podem ser utilizados processos posteriores de acabamento, dentre eles estão inseridos o alargamento, a retificação, o mandrilamento e o brochamento (CAVALER 2003).

Quando se utiliza brocas com diâmetros pequenos, recomenda-se o emprego de um ciclo “pica-pau” de furação para que ocorra a remoção do cavaco com maior facilidade. São consideradas nesta categoria brocas com relação comprimento/diâmetro menor que três vezes, devido à importância para a chegada do fluido de corte na ponta da ferramenta (OBERG et al. 2004).

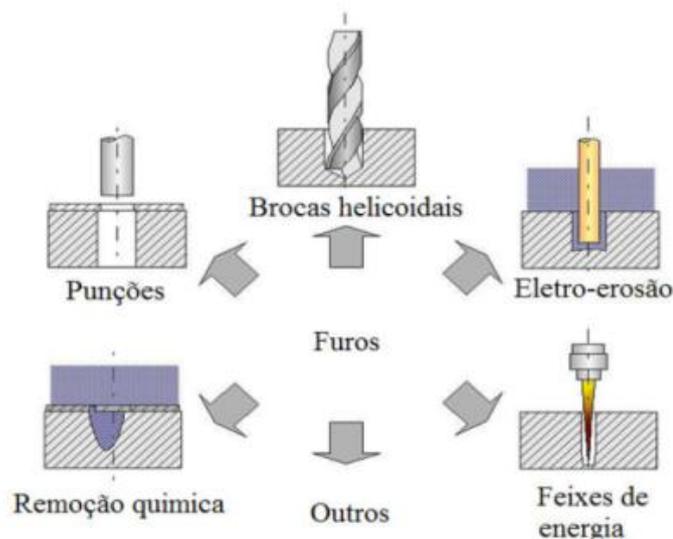


Figura 3.2 Formas de se obter furos (Adaptado de STOETERAU 2007).

3.2 Brocas helicoidais

Sua forma construtiva é composta de uma haste cilíndrica e uma parte cortante que pode ser afiada de maneiras distintas conforme o material a ser usinado. Geralmente, apresenta dois gumes principais ligados através da aresta transversal, contudo podem ter três ou mais gumes cortantes, a fim de se reduzir os erros de posicionamento, melhorar o fluxo de cavaco e reduzir as forças de corte e avanço (DINIZ et al. 2008).

A identificação das brocas helicoidais é realizada pelo material da ferramenta, o formato da haste, o número de canais, o sentido de corte, o comprimento, o diâmetro e o tipo de afiação. Estas ferramentas são fabricadas em aço rápido, de acordo com as normas DIN 1412 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 1966), DIN 1414-1 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 1998) e DIN 1414-2 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 1998).

3.2.1 Geometria de brocas helicoidais

A geometria da broca helicoidal apresenta superfícies e arestas de corte com dois gumes na parte ativa da ferramenta, constituída pelas suas cunhas de corte e formadas pela intersecção das superfícies de saída e folga e pelo gume transversal, que devido ao movimento de avanço se torna uma parte integrante do gume principal. Nas brocas helicoidais, o ângulo de hélice da broca define o ângulo de saída, que não é constante ao longo do gume principal, mas apresenta o seu valor máximo na ponta de corte e diminui no sentido de centro, se

tornando negativo na passagem para o gume transversal. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra os principais ângulos das brocas helicoidais (CASTILLO 2005).

3.2.2 Partes de uma broca helicoidal

Segundo Stemmer (2007), as partes que compõem uma broca helicoidal são as seguintes:

- Canais: Onde é realizada a remoção dos cavacos durante o processo de furação. Tem como função também a chegada do fluido de corte na peça;
- Gume Principal: Na aplicação em geral se utiliza $\sigma=118^\circ$, mas na verdade depende do material que será furado. Estes gumes são paralelos entre si e na visão frontal formam o ângulo de ponta σ ;
- Gume transversal: É formado pelos gumes principais e encontra-se na ponta da broca;
- Guias e nervuras: Tem função de guiar a broca dentro do furo e evita que a parte externa da broca atrite com as paredes do furo (DINIZ et al. 2008);
- Haste: Pode ter o formato cônico – DIN 345 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 1978) o cilíndrico – DIN 338;
- Núcleo: Onde se obtêm a rigidez da broca. Possui espessura de aproximadamente $0,16x$ o diâmetro da broca (FERRARESI 1970).

Na Figura 3.3, pode-se observar as principais partes de uma broca helicoidal, isto é, face, gume principal, flanco, guia principal, canal, gume principal, quina, gume principal e diâmetro.

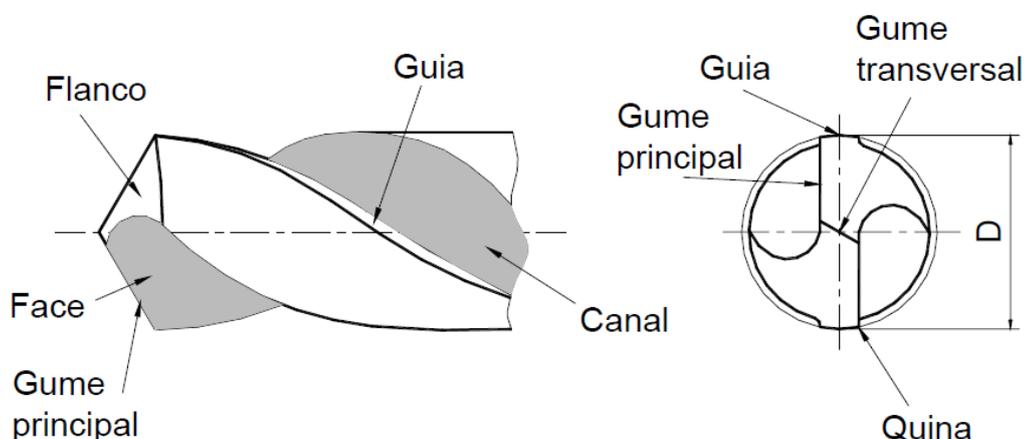


Figura 3.3 Gumes de uma broca helicoidal (adaptado de MARQUES 2012).

3.3 Grandezas de corte ou parâmetros de usinagem

Os parâmetros de usinagem na furação podem ser administrados para o atendimento das necessidades de tempo, custo, especificação de produto, equipamento entre outros. São definidos de acordo com o material a ser usinado, equipamento disponível e ferramentas. O controle dos parâmetros é utilizado para a estimativa de vida de ferramentas. A resistência das ferramentas bem como o equipamento disponível são fatores determinantes para a definição dos parâmetros de usinagem permissíveis para o processo (MARQUES 2012; FERRARRESI 1970).

3.3.1 Avanço (f_n)

Avanço de corte é a grandeza do movimento de avanço medido do plano de trabalho da ferramenta. É a velocidade de translação da broca no sentido axial, normalmente expressado por mm/rot ou em mm/min (MARQUES 2012).

3.3.2 Profundidade de corte (a_p)

Refere-se a profundidade de penetração do gume principal, medida perpendicularmente ao plano de trabalho (STEMMER 2005). Pode ser visualizada na Figura 3.4.

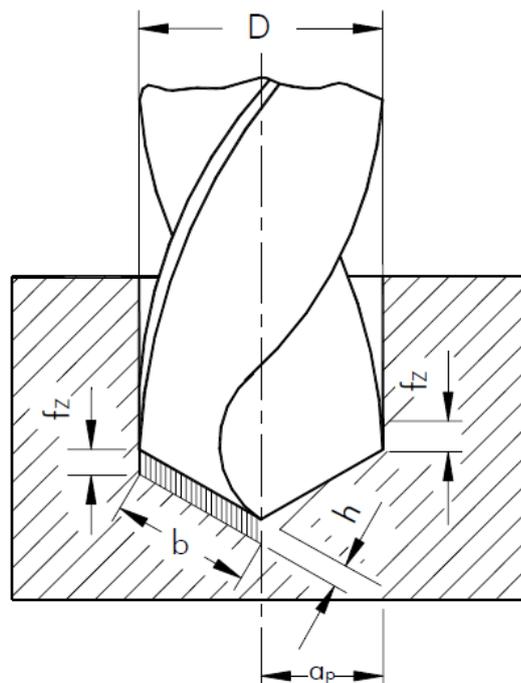


Figura 3.4 Largura e profundidade de corte (a_p) (Adaptado de DINIZ et al. 2008).

3.3.3 Velocidade de corte (V_c)

A velocidade de corte se relaciona diretamente com o diâmetro do furo e a rotação da ferramenta. Tem influência direta na vida da ferramenta, material usinado, tempo de usinagem, acabamento e potência consumida. Pode ser determinada em função da produtividade esperada e do material da peça a ser usinada. É considerada como velocidade de corte nominal aquela que ocorre no diâmetro do processo de corte. Pode-se calcular pela Equação 1 (STEMMER 2005; MOCELIN 2002):

$$V_c = \frac{\pi dn}{1000} [m/min] \quad (1)$$

Onde:

d = Diâmetro da ferramenta (mm)

n = Rotações por minuto [min^{-1}]

3.3.4 Largura de usinagem (b)

Segundo Ferrarresi (1970), a largura de usinagem (b) é a largura de cavaco a ser retirado e medido na intersecção da superfície de corte com o plano normal a velocidade de corte, passando pelo ponto de referência do gume. Pode ser calculada pela equação 2:

$$b = \frac{D}{2 \cdot \text{sen} \left(\frac{\sigma}{2} \right)} [mm] \quad (2)$$

Onde:

D = diâmetro da ferramenta [mm];

σ = ângulo da ponta da ferramenta [graus].

3.3.5 Espessura de usinagem (h)

De acordo com Castillo (2005), a espessura de usinagem é proporcional ao avanço e deve ser medida perpendicularmente ao gume, utilizando-se a Equação 3:

$$h = \frac{f}{2} \cdot \text{sen} \left(\frac{\sigma}{2} \right) [mm] \quad (3)$$

Onde:

f = avanço da ferramenta [mm].

σ = ângulo da ponta da ferramenta [graus];

3.4 Revestimentos de brocas helicoidais

Os revestimentos superficiais possuem como característica principal a capacidade de melhorar as propriedades de resistência ao desgaste das ferramentas, devido a redução do atrito na superfície na saída do cavaco, servindo de isolante químico, aumentando a vida e reduzindo esforços no processo de usinagem. Em alguns casos, os revestimentos podem promover a utilização de usinagem sem lubri-refrigerantes, mas no processo de furação em si somente o revestimento não é suficiente (BORK 1995; DINIZ et al. 2008).

Os revestimentos em múltiplas camadas ou aplicados de forma isolada, podem contribuir para a diminuição do desgaste relacionado ao processo de furação. No caso de furação com utilização de multicamadas de TiN e TiAlN no processo de furação de ferro fundido nodular GH190, o recuo total das ferramentas, ou seja, durante a realização do furo, quando o processo é interrompido, a ferramenta é recuada até a saída do furo, para que ocorra a total extração do cavaco, foi identificado como influente na vida da ferramenta, quando comparado com apenas 3mm de recuo, ou seja, no momento da interrupção da furação a ferramenta retorna apenas 3 mm para que ocorra a expulsão do cavaco, proporcionando um aumento da vida das brocas em até 40 furos (SILVA et al. 2011).

No estudo de Braic et al. (2010) sobre a utilização de camadas de revestimento isoladas de TiN, TiAlN e TiAlZrN sobre brocas helicoidais de aço rápido, foi observado um incremento de desempenho em relação a brocas sem revestimento de aproximadamente 1,8 vezes. Entretanto, as brocas de aço rápido com multicamadas de TiAlN/TiAlZrN apresentam desempenho superior de 2,1 a 2,3 vezes se comparando com as brocas sem revestimento. As camadas que obtiveram este desempenho superior tinham aproximadamente 13,3 nm (BRAIC et al. 2010).

Outra característica da deposição do revestimento está relacionada com o crescimento do filme, que no caso do TiN depende em parte da estrutura do substrato nas primeiras camadas de deposição. No caso do aço rápido, devido as várias fases presentes, a nucleação do filme ocorre preferencialmente sobre estruturas cristalinas similares ao TiN. Como o Carbetto de Vanádio (VC) tem a mesma estrutura do TiN e parâmetro de rede próximo, ocorre o favorecimento da nucleação do filme e conseqüente melhora da adesão (HIBBS et. al. 1984). O parâmetro de rede identificado para o MC, carboneto com alto percentual de vanádio

em sua composição, fica com valor de $4,17 \text{ \AA}$ (SERNA 2008). Já o parâmetro de rede observado para o TiN é de $4,24 \text{ \AA}$ nm (KIECKOW 2008).

O processo de revestimento pode ser realizado via CVD (deposição química por vapor) ou PVD (deposição física por vapor), sendo diferenciadas pelo mecanismo de geração e transporte do vapor. Em brocas, o processo mais utilizado é o PVD, em função da facilidade de deposição. Os revestimentos mais utilizados em furação se caracterizam pela cor, dureza, espessura, aplicabilidade e desempenho (BERG et al. 2002; DINIZ et al. 2008).

A deposição física por vapor (PVD) é o processo de deposição atômica em que o material de revestimento no estado sólido ou líquido é vaporizado, na forma de átomos ou moléculas, e transportado na forma de vapor em meio de baixa pressão ou vácuo até o substrato (DONALD 1998).

Os filmes produzidos por PVD são utilizados para melhorar as propriedades mecânicas dos materiais no sentido de aumentar a sua vida útil. Podem ser depositados, basicamente, por *sputtering*, *ion plating* ou por vaporização a vácuo (KRAUSS 1990; STOETERAU 2007).

Na Figura 3.5 pode ser observada a configuração do processo PVD por vaporização à vácuo, onde o material que vai sofrer a deposição pode ser observado no interior do conversor. O processo ocorre em alto vácuo, em torno de $0,001 \times 10^{-5}$ bar de pressão e com o auxílio de gases reativos, porém, com baixa resistência a aderência (STOETERAU 2007).

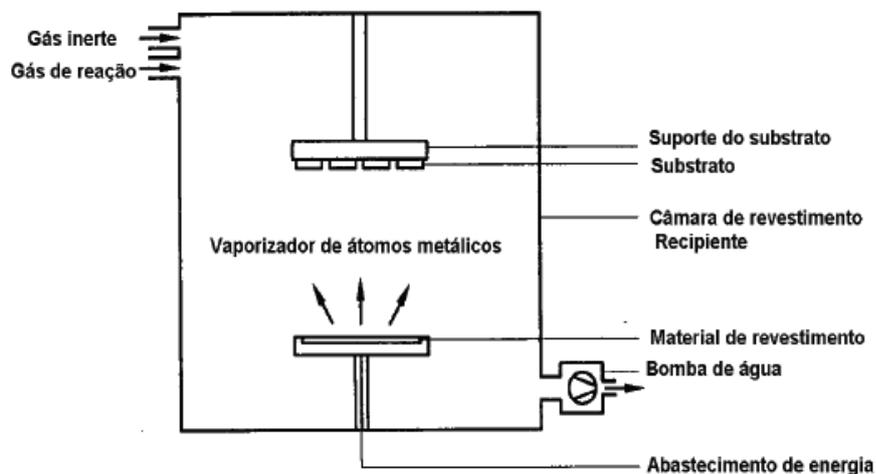


Figura 3.5 Esquema do processo de vaporização á vácuo (Adaptado de STOETERAU 2007).

A esquematização do processo de *sputtering* pode ser observado na Figura 3.6. Neste processo a pressão de câmara gira em torno de 0,1 a 10×10^{-5} bar e a tensão do alvo e do substrato na faixa de 500v a 5000v. Íons de alta energia cinética situados na placa de material que vai ser vaporizado e impulsos elétricos projetam os íons sobre os átomos responsáveis pelo revestimento, formando uma nuvem de átomos que se depositam sobre o substrato. Tem como característica uma deposição balanceada com boas possibilidades de controle de processo (STOETERAU 2007; VIANA et al. 2003).

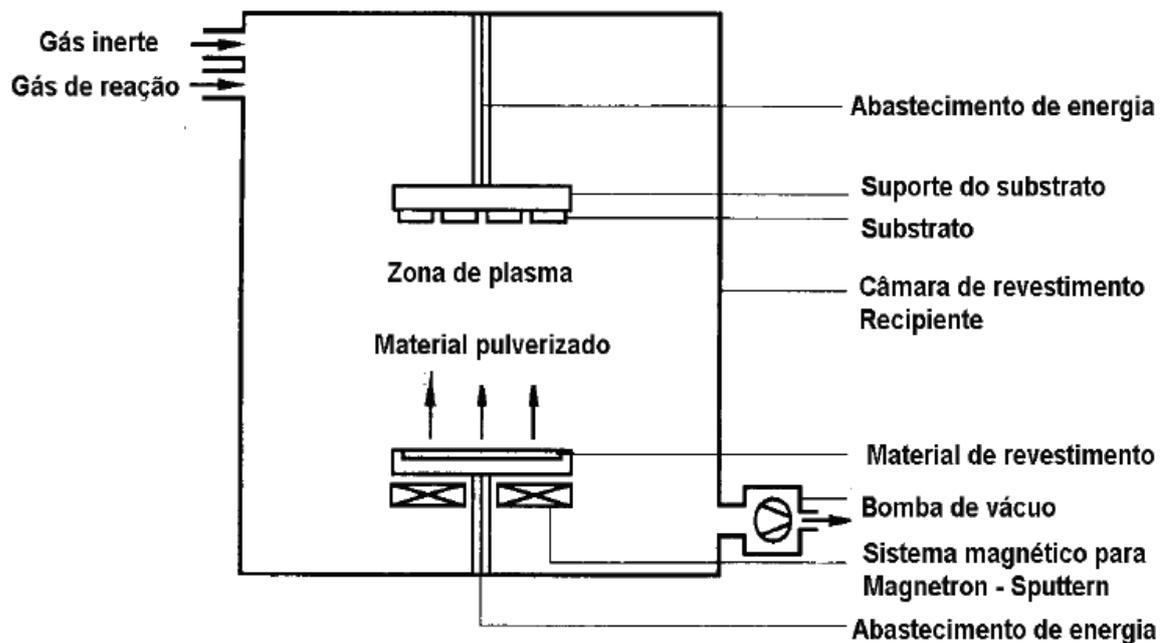


Figura 3.6 Processo de *sputtering* (Adaptado de STOETERAU 2007).

No processo por *ion plating*, mostrado na Figura 3.7, acontece a vaporização do material a ser revestido por arco voltaico, resistor ou feixe de elétrons. A tensão negativa ocorre no substrato e íons vaporizados são lançados sobre as peças combinados com a injeção de gás reativo dentro da câmara. Após, os gases são evacuados colocando-se uma atmosfera protetora com gás inerte. Tem como consequência a limpeza das peças devido a presença do vácuo em alta temperatura e pelo bombardeio de gás inerte ionizado, produzindo uma superfície com boa adesividade para o revestimento (STOETERAU 2007; VIANA et al. 2003).

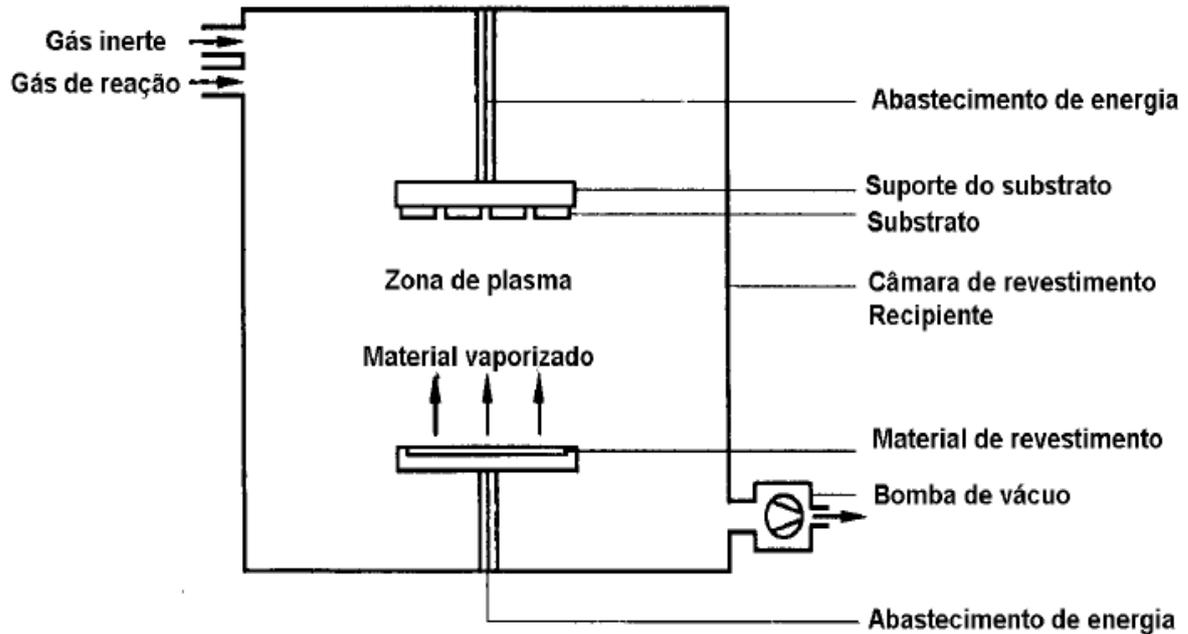


Figura 3.7 Processo *Ion plating* (Adaptado de STOETERAU 2007).

Dentre os tipos de revestimento que podem ser utilizados estão o carbonitreto de titânio (TiC), que tem como característica a diminuição do atrito e a menor condutividade térmica da camada aplicada, produzindo temperaturas menores no gume e, com isto, o desgaste por difusão e atrito do gume é diminuído (CASTILLO 2005).

O Nitreto de Titânio (TiN) é quimicamente mais estável que o TiC, isto é, tem menor tendência a fenômenos de difusão em aços. Os revestimentos com TiN propiciam velocidades de corte de 2,5 a 4 vezes maiores e avanços de 3 a 5 vezes maiores em relação à brocas não revestidas. Possui dureza em torno de 2300 HV, sendo muito utilizado em materiais dúcteis, como aço de baixo carbono e todas as classes de alumínio, com baixas forças de corte (MARQUES 2012; CASTILLO 2005; DINIZ et al. 2008).

O Carbonitreto de Titânio (TiCN) possui dureza maior que os revestimentos de TiN. Possui vida útil maior que outros revestimentos, sendo recomendado para furação de aços inoxidáveis, ferro fundido, latão, bronze, alumínio e materiais termoplásticos (CASTILLO 2005). São revestimentos recomendados onde o desgaste por abrasão é predominante ou onde se necessita uma maior resistência a oxidação. Normalmente é aplicado em multicamadas (VIANA et al. 2003). Possui a boa resistência ao desgaste de flanco do TiC e a boa estabilidade química do TiN (OLIVEIRA 2008).

O Nitreto de Titânio-alumínio (TiAlN) serve como alternativa na redução da utilização de fluidos de corte na usinagem que busca a diminuição da poluição ambiental. O bom desempenho da usinagem a seco com ferramentas de corte revestidas com TiAlN se deve ao fato que esse revestimento mantém as propriedades de alta dureza e resistência à oxidação operando a altas temperaturas (SANTOS 2004). Neste revestimento, alguns átomos de Al substituem átomos de Ti, proporcionando uma maior resistência ao desgaste, oxidação e estabilidade química, dependendo da aplicação. A elevada resistência à oxidação pode ser atribuída a formação de uma camada de óxido de alumínio interna e uma camada de óxido de titânio na interface entre o revestimento e o substrato (ANDRADE 2005).

O Nitreto de Cromo-alumínio (AlCrN) tem elevada resistência à oxidação e dureza a quente, ou seja, ótima resistência à abrasão e baixo coeficiente de atrito. Possui dureza em torno de 3200 HV e temperatura de trabalho de 1100°C. Pode ser utilizado em usinagem a seco e refrigerado de aços e ferros fundidos (BALZERS 2013).

O Óxido de alumínio (Al_2O_3) é utilizado nos revestimentos para imprimir maior resistência ao desgaste, alta dureza e inércia química. Possui alta resistência à formação de desgaste de cratera. Possui elevada dureza a quente, estabilidade química e propriedades refratárias. Normalmente, é aplicado sobre a camada de TiC (MARQUES 2012).

3.5 Testes de qualidade de revestimentos

O teste de indentação tem a capacidade de avaliar a qualidade da adesão de revestimentos, sendo facilmente executado e amplamente utilizado no controle da qualidade. Neste teste, utiliza-se um durômetro onde se realiza uma indentação com cargas pré-definidas provocando uma série de falhas na camada em torno da impressão. Para a análise, utiliza-se um microscópio com 100x de aumento e se compara com a impressão mostrada na Figura 3.8. O teste de indentação foi desenvolvido pela *Union of german engineers* (Verein Deutscher Ingenieure – VDI) e na avaliação dos revestimentos se utiliza a norma VDI 3198 (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 1993) (ANDRADE 2008).

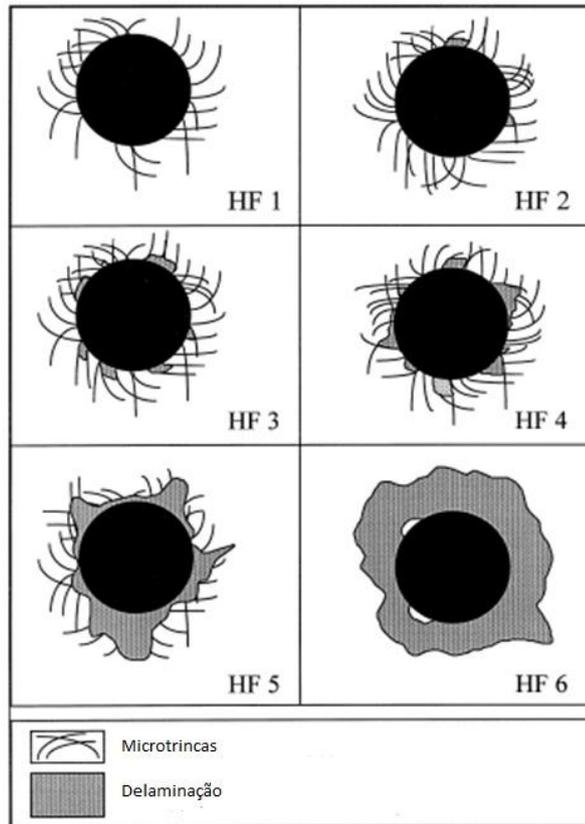


Figura 3.8 Classes da qualidade de adesão segundo VDI 3198 (Adaptado de VDI 3198 1992).

O teste de riscamento consiste na aplicação de uma determinada força utilizando-se um penetrador cônico de diamante com um raio de 200 micrometros, percorrendo uma distância de 10mm para verificar a aderência do filme depositado, utilizando-se força variável ou constante de aplicação. A forma e a força necessária para que ocorra o deslocamento do filme podem ser observados por este ensaio (WOLF 2007; SOUSA 2004). Também pode ser obtida a carga crítica no qual o revestimento pode ser removido. Uma ilustração sobre o sistema pode ser observada na Figura 3.9 (SAMAR 2004).

Quando o teste é finalizado, a trilha de riscamento pode ser associada a falha do revestimento: coesivo ou adesivo. Quando ocorre a falha por coesão, pode-se relacionar com uma boa adesão, onde o substrato não fica exposto. Seu aspecto pode ser visualizado na Figura 3.10-a. Quando a falha é relacionada com a adesão, ocorre a exposição do substrato, devido delaminação do filme. Sua característica pode ser observada na Figura 3.10-b (ANTUNES 2006).

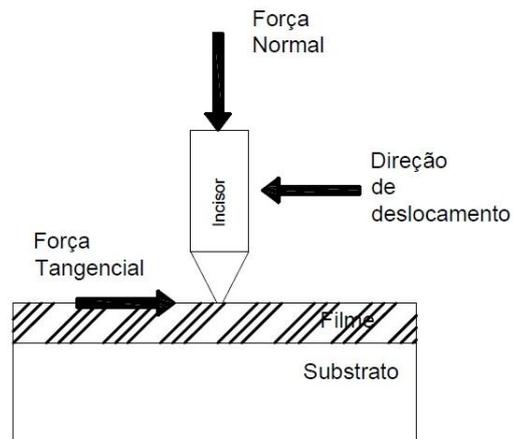


Figura 3.9 Esquema de forças atuando sobre o incisor durante o teste de riscamento (Adaptado de SOUSA 2004).

A norma DIN 1071-3 indica a forma como o deslocamento ocorre durante o teste de riscamento, sendo que as principais características podem ser observadas na Figura 3.11, onde são evidenciados os modos de falhas:

- a) Filme deslocado;
- b) Trincamento do filme à frente do penetrador e posterior deslocamento;
- c) Formação de trincas ao longo do risco e de deslocamentos laterais;
- d) Ocorrência de trincas ao longo de todo o risco;
- e) Ocorrência de trincas de adaptação ao longo do filme.

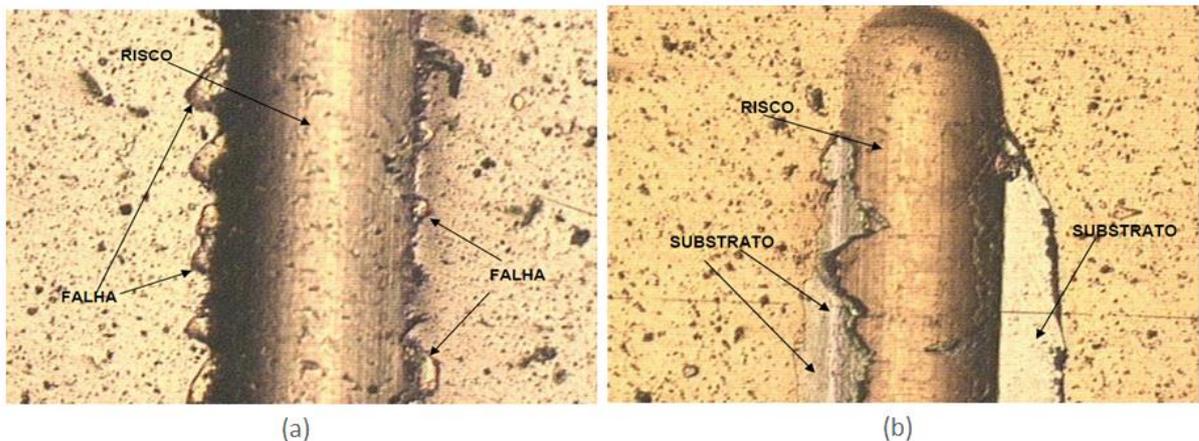


Figura 3.10 A) Falha coesiva, onde o substrato não fica exposto. B) Falha adesiva, onde o substrato fica exposto. Ambas ocorridas sobre um revestimento PVD (Adaptado de ANTUNES 2006).

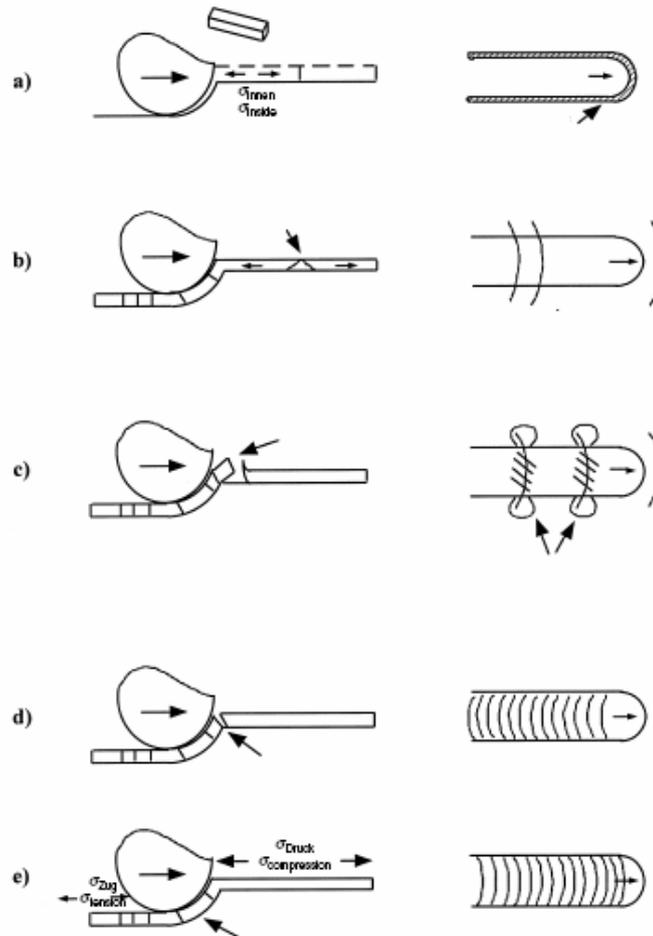


Figura 3.11 Modos de deslocamento durante teste de riscamento (Adaptado DIN1071-3:2005).

A razão da dureza pelo módulo de elasticidade do material (H/E) fornece uma indicação qualitativa da resistência ao desgaste do material. Quanto maior a razão, maior a carga necessária para deformá-lo plasticamente (LEYLAND E MATTHEWS, 2000). Para o revestimento aplicado sobre o substrato, quanto mais próxima a razão H/E do revestimento em relação ao substrato, maior a adesão entre os materiais (SUN, et al. 1995; ZLATANOVIC et al., 1996; LEYLAND e MATHTEWS 2000).

A camada de óxido presente na superfície do substrato quando da aplicação do revestimento influencia na interface substrato-TiN, gerando uma menor adesão do revestimento, e quando comparada ao substrato com essa camada removida, a capacidade de adesão aumenta significativamente (KIEKHOW et al. 2006; ABISSET et al. 1998).

A medição de nanodureza consiste na aplicação de uma carga, sobre um indutor de geometria conhecida, montado sobre uma coluna rígida onde se coletam os dados de

deslocamento e força aplicada. A medida que ocorre a penetração do indentador, são realizadas deformações plásticas e elásticas, com uma profundidade limite, gerando uma impressão do formato do penetrador. Assim, são geradas as curvas do penetrador em relação à carga e a descarga. Na Figura 3.12 pode ser observada uma curva genérica da para o ensaio de nanodureza (TEDESCO 2007).

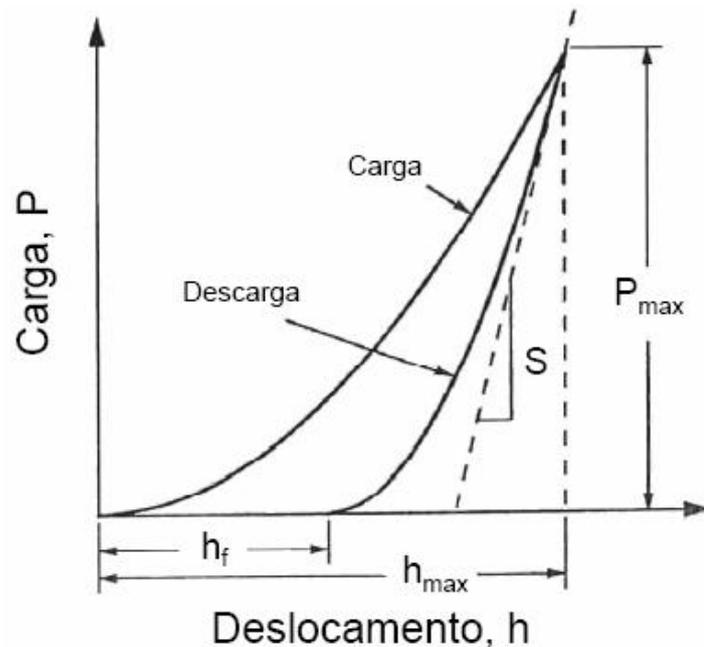


Figura 3.12 Curva característica do ensaio de nanodureza (Adaptado de TEDESCO 2007).

Na preparação da superfície para a nanoindentação as amostras necessitam de polimento específico, devido as pequenas cargas aplicadas e para que se obtenha uma rugosidade superficial de alta qualidade e com boa uniformidade, para que o penetrador não se posicione em relevos que dificultem a medição (LEPIENSKI et al. 1998). Neste ensaio, o tipo de penetrador mais utilizado, tipo Berkovich, possui geometria piramidal com base triangular. A partir deste ensaio, pode ser conhecido o valor experimental para a dureza (H) e para o módulo de elasticidade (E), muito importante na caracterização de filmes finos aplicados sobre diversos tipos de substratos (MELLO 2011).

3.6 Mecanismos de desgaste de ferramentas

As solicitações térmicas, mecânicas e tribológicas oriundas dos processos de usinagem levam a sobrecargas e desgastes dos gumes de corte. Este sinal se transforma em desgaste das ferramentas de várias maneiras, como desgaste de cratera, desgaste de flanco, lascamentos ou deformações plásticas (CASTILLO 2005).

Na Figura 3.13, observa-se o diagrama de atuação dos mecanismos de desgaste, sendo em baixas temperaturas os mecanismos de desgaste de maior atuação a adesão, em conjunto com abrasão e para altas temperaturas os mecanismos de oxidação e difusão (MARQUES 2012).

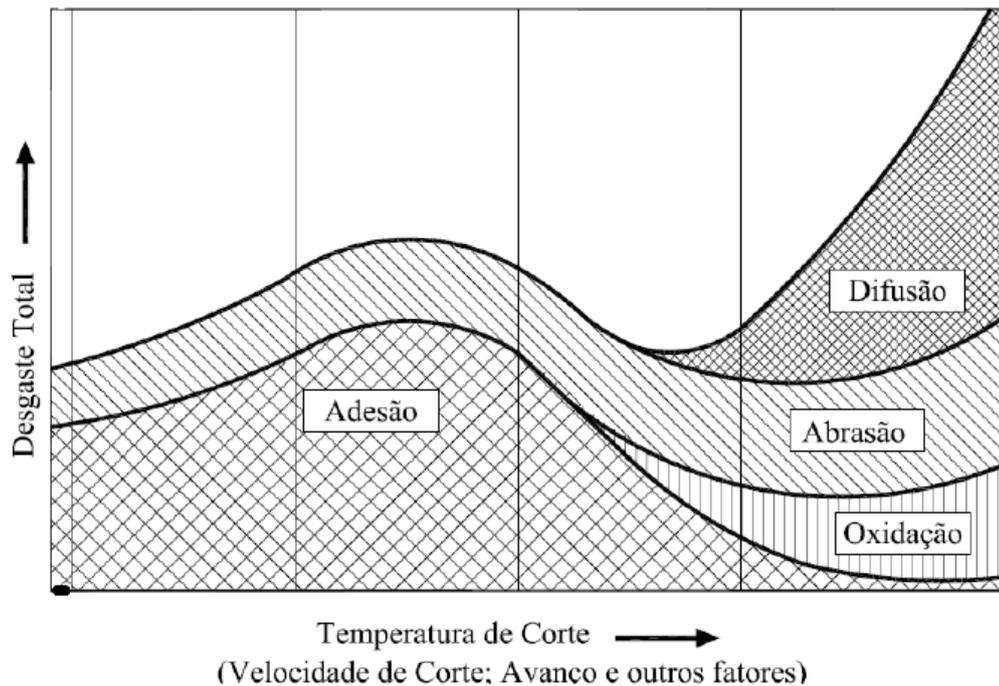


Figura 3.13 Diagrama de distribuição dos mecanismos de desgaste (Adaptado de KONIG et al. 1997).

3.6.1 Abrasão

O desgaste frontal e o de cratera podem ser gerados pela abrasão, sendo uma das principais causas de desgaste das ferramentas. Este tipo de desgaste se intensifica pela temperatura e pela presença de partículas duras no material usinado. A característica de dureza a quente da ferramenta também aumenta a resistência à abrasão. O arrancamento de partículas de outras regiões por aderência e também por abrasão arrastadas pela movimentação da peça origina o desgaste abrasivo (DINIZ et al. 2008).

3.6.2 Adesão

A adesão normalmente ocorre em baixas temperaturas de corte, formando a aresta postiça na ferramenta. O corte interrompido, o contato da ferramenta, a irregularidade da profundidade de usinagem, a baixa rigidez e fluxos irregulares de cavaco causam pequenos

caldeamentos do cavaco na superfície da ferramenta. Os materiais com as solicitações irregulares fadigam, removendo partes da superfície (TRENT e WRIGHT 2000).

3.6.3 Difusão

A difusão é a transferência de átomos de um material para outro causando variações nas propriedades superficiais da ferramenta. A formação de compostos químicos com baixa resistência à abrasão são as consequências deste tipo de desgaste. A combinação de elevadas temperaturas, afinidade química entre o material e a ferramenta e a permanência em contato são os fatores que devem ocorrer para gerar o desgaste por difusão (KONIG E KLOCKE 1997).

3.6.4 Oxidação

O desgaste por oxidação ocorre a partir da alta temperatura dos metais em combinação com ar e água. A sua formação em áreas adjacentes ao contato do cavaco com a ferramenta origina a ocorrência de bolhas de óxidos. Em ferramentas de metal duro, ocorre a formação de óxido de tungstênio, cobalto e ferro provocando o lascamento da aresta de corte (TRENT e WRIGHT 2000).

3.6.5 Aderência

Pode ser observada em processos de usinagem com baixa velocidade de corte associada as baixas temperaturas. Gera um filme metálico, com alta resistência, e com a tentativa de realizar a separação das superfícies ocorre a ruptura de um dos metais, permanecendo o filme da superfície de contato. Normalmente é observado pela presença do gume postiço, bem como no desgaste por entalhe. A lubrificação e a presença dos revestimentos tem diminuído a incidência deste mecanismo de desgaste (DINIZ et al. 2008; MARQUES 2012).

3.7 Formas de desgastes em brocas

No processo de furação, ocorre a variação da velocidade de corte ao longo da aresta de corte e também a dificuldade de expulsão dos cavacos que são geradores de abrasão mecânica, principal mecanismo de desgaste (ANDRADE 2005).

A adesão, a difusão e a oxidação não são frequentes em processo de furação. A verificação do desgaste de abrasão é a forma utilizada como critério de fim de vida da

ferramenta em função da gradual propagação do desgaste. Na Figura 3.14, observa-se o desgaste em brocas nos flancos, nas superfícies de saída do cavaco, na aresta transversal, nas pontas e nas guias. Com isto, pode ser possível identificar os mecanismos de desgaste (BORK 1995).

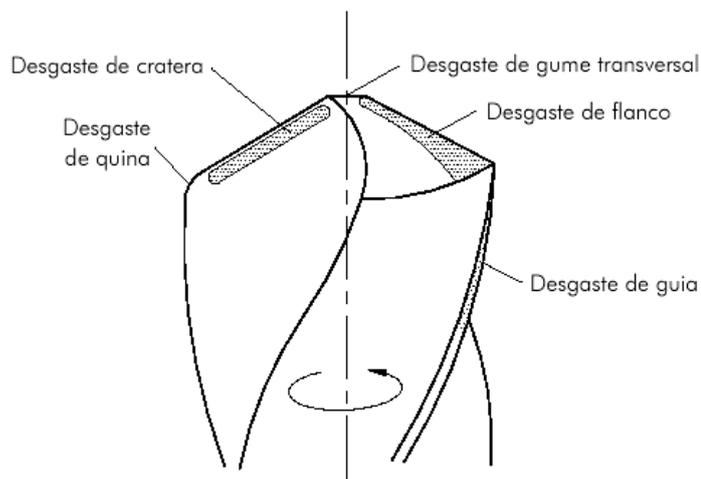


Figura 3.14 Tipos de desgaste por abrasão em uma broca (Adaptado de BORK 1995).

A aresta transversal é onde ocorre o primeiro contato entre a broca e a ferramenta, sendo uma das regiões mais críticas em função da compressão gerada pelo movimento de avanço e da redução da velocidade de corte nesta região. O atrito das arestas de corte contra a superfície da peça são a origem para o desgaste de flanco. O monitoramento do desgaste de flanco, como mostrado na Figura 3.15, é representado pela faixa de desgaste nos flancos da ferramenta ao longo da aresta principal de corte, sendo geralmente mais larga na ponta ($VB_{máx}$). Pode ser verificado o desgaste de flanco pelo $VB_{médio}$, onde se considera o desgaste médio de flanco. Utiliza-se o desgaste de flanco para a comparação do desempenho da ferramenta sob diferentes condições de usinagem. As consequências do aumento do desgaste de flanco são o aumento das forças de corte, a diminuição da qualidade superficial dos furos, bem como o aumento dos erros dimensionais. A Equação 4 mostra a forma de determinação do valor de fim de vida (BORK 1995; FORTUNATO 2012):

$$VB_{máx} = 0,1 \times D \text{ [mm]} \quad (4)$$

Onde:

$VB_{máx}$ = Desgaste máximo de flanco [mm];

D = Diâmetro da broca [mm].

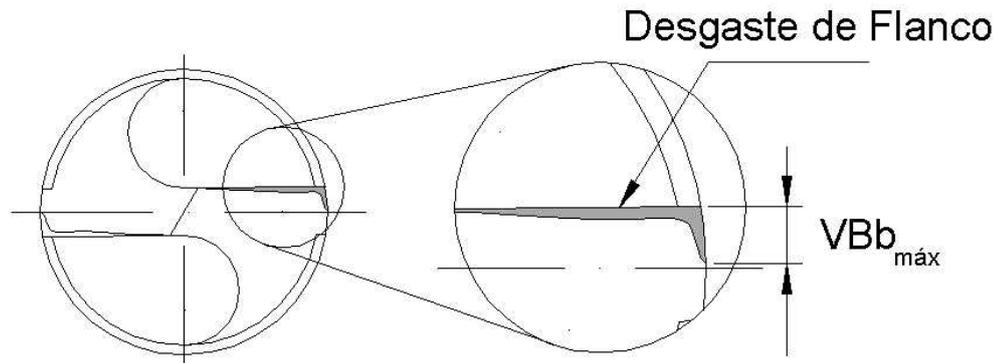


Figura 3.15 Desgaste de flanco em brocas helicoidais (Adaptado de SCHROETER et al. 1999).

3.7.1 Critérios de fim de vida

Ao longo do processo de usinagem são observados aumentos progressivos de temperatura, força de corte, consumo de potência do equipamento e a ocorrência de alterações na superfície e na qualidade superficial. No caso de ferramentas de metal duro, estes efeitos provocam o lascamento e a deterioração do gume de corte, não sendo aconselhável a sua utilização. A relação do desgaste e a qualidade de usinagem não obedece uma única regra. Nas linhas industriais, o número de peças produzidas é o critério adotado como fim de vida (CASTILLO 2005).

Os fatores mais comuns a serem considerados para os critérios de fim de vida são a falha completa da ferramenta, falha preliminar da ferramenta, largura da marca de desgaste no flanco $VB_{\text{máx}}$, vibrações intensas da peça ou da ferramenta, profundidade de cratera, deficiência no acabamento da superfície, formação de rebarbas, variação na forma dos cavacos, alteração das dimensões da peça, força de corte, torque ou potência, aumento da força de avanço, aumento da temperatura do gume e número de peças usinadas (CASTILLO 2005).

3.8 Qualidade superficial na furação

A qualidade superficial das superfícies usinadas pode ser verificada com os parâmetros de rugosidade superficial, ondulações, falhas e marcas de avanço. Porém, o parâmetro de rugosidade é utilizado por mensurar as irregularidades comparadas com uma

superfície de referência. A medição da rugosidade é realizada com o rugosímetro onde se realiza o contato do apalpador com a superfície usinada (SANTOS 2008; MARQUES 2012).

Dentre as variáveis consideradas influentes na rugosidade superficial estão a velocidade de corte, que tende a melhorar a rugosidade conforme ocorre o seu aumento, as dimensões de corte, como avanço e profundidade de corte, que podem gerar efeitos que contribuem com a rugosidade, os ângulos da ferramenta, a quina de corte, o material da ferramenta, o material da peça e também os meios lubri-refrigerantes. A rugosidade de superfícies usinadas está relacionada, principalmente, com as marcas de avanço provocadas pelas ferramentas e também com os fragmentos de gume postiço gerados durante a expulsão do cavaco (STEMMER 2007).

Nos processos produtivos, os parâmetros utilizados para a verificação da rugosidade são o R_a , R_y , R_t e R_z , que podem ser visualizados na Figura 3.16, que mostra os conceitos básicos para a verificação dos perfis de rugosidade. Na avaliação da qualidade de superfície, é realizada a medição da variação horizontal e vertical combinadas. Estes valores estão relacionados com o projeto, os mecanismos de desgaste, relações de atrito e a capacidade de lubrificação (CAVALCANTE 2010). A norma DIN 4768 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 1974) estabelece para o parâmetro R_a uma faixa de aplicação de 1,6 a 12,5 micrometros, sendo enquadrado na tolerância ISO T 9, que pode ser observada na Figura 3.17:

A descrição dos parâmetros de verificação da qualidade superficial são os seguintes:

- R_a : desvio médio aritmético, sendo a média dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo em relação a linha média em um comprimento de amostragem;
- R_y : é o maior valor das rugosidades parciais que se apresenta no percurso da medição de um dado comprimento pré-definido, sendo a máxima altura entre pico e vale;
- R_t : é a soma da altura do pico mais alto com referência a linha média e da profundidade do vale mais profundo a partir da linha média;
- R_z : é obtido com o total das duas médias entre os cinco picos mais altos e a profundidade média dos cinco vales mais profundos, referenciados pela linha média (MARQUES 2012).

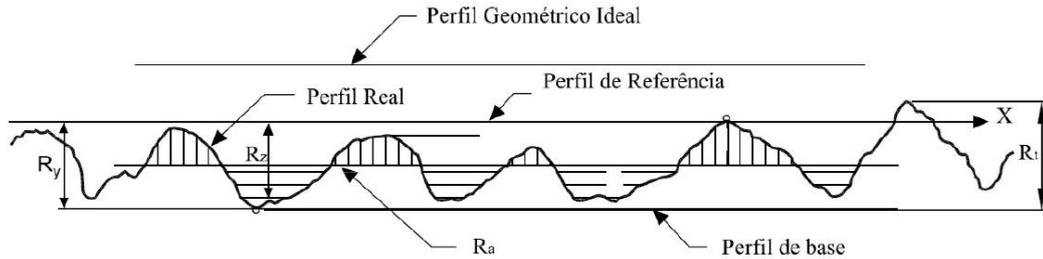


Figura 3.16 Conceitos básicos para verificação de rugosidade superficial (Adaptado de CASTILLO 2005).

Método de manufatura	Valores atingíveis médios de R_a (mm)													
	0,006	0,012	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50
Furação									■	■	■	■	■	■
Alargamento						■	■	■	■	■	■	■	■	■
Mandrilamento				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Torn. Longitudinal						■	■	■	■	■	■	■	■	■

Valores possíveis
 Valores comuns

Figura 3.17 Tabela de tolerâncias do processo de usinagem (Adaptado de MARQUES 2012).

3.9 Materiais para ferramentas

Na seleção de um material para uma ferramenta de corte de furação devem ser consideradas a resistência ao desgaste e a tenacidade como os principais critérios de escolha, em função do desgaste por abrasão, forças de compressão, flexão e torção estarem muito presentes no processo. Devido ao grande aumento de capacidade de equipamentos presentes no mercado em relação a potência, rigidez e capacidade tem ocorrido a introdução de novos materiais para a fabricação das ferramentas (KONIG et al 1997; DINIZ et al. 2008).

Entre as propriedades fundamentais para a eficiência da ferramenta de furar estão a dureza em altas temperaturas, para que tenha resistência ao desgaste e resistência mecânica em altas temperaturas de trabalho, a tenacidade, para que suporte esforços cíclicos comuns em usinagem, a resistência ao desgaste, para que tenha durabilidade de acordo com o processo e a estabilidade química, com o objetivo de que não ocorra a reação com o material a ser usinado e para que não seja contaminado (MARQUES 2012).

O aço rápido possui altos percentuais de elementos de liga como o tungstênio (W), molibdênio (Mo), cromo (Cr), cobalto (Co), vanádio (V) e nióbio (Nb). Tem como principal característica a elevada dureza a quente e a tenacidade, podendo ser usado em temperaturas de até 600°C (DINIZ et al. 2008).

Os aços rápidos conhecidos são classificados em dois grupos, os aços ao molibdênio, da categoria M e aços ao tungstênio, categoria T. Normalmente, os aços rápidos da classe M são os utilizados para a fabricação de brocas helicoidais. As características principais destes aços são a tenacidade, a resistência à torção e a resistência à oxidação. Os aços rápidos possuem um tratamento térmico complexo, exigindo temperaturas em torno de 1.300°C para a têmpera (STEMMER 2007; SILVA 2010; SMITH 2008).

A Figura 3.18 mostra a classificação dos materiais utilizados para ferramentas de corte de acordo com a sua dureza e tenacidade, sendo o aço rápido (HSS) o mais tenaz, mas com a menor dureza e resistência ao desgaste e o PCD (Diamante policristalino) seguido pelo CBN (Nitreto cúbico de boro) e de menor tenacidade porém com maior dureza e resistência ao desgaste (DORMER 2008).

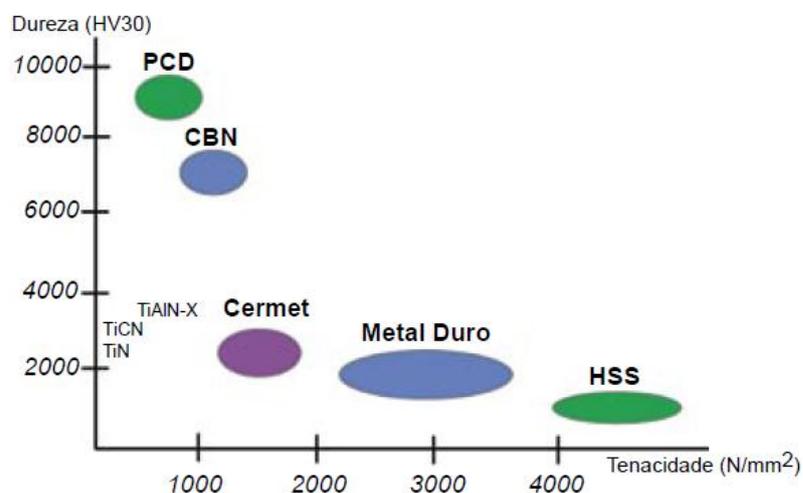


Figura 3.18 Materiais utilizados para ferramentas de corte (Adaptado de DORMER 2008).

A utilização do aço rápido sinterizado permite a presença de carbonetos com tamanhos menores e bem distribuídos e um maior número de elementos de liga, uma melhor resistência a compressão, usinabilidade, tenacidade e facilidade de tratamento térmico (AMORIM 2002).

O metal duro é obtido a partir do processo de metalurgia do pó, sendo constituído por partículas de WC e um ligante rico em Co. Na Tabela 3.1, verifica-se a aplicação das

ferramentas de metal duro conforme a sua classificação, sendo P para materiais maleáveis, M para ferros fundidos e algumas classes de aço inox e K para aços endurecidos, algumas classes de ferro fundido, materiais não metálicos e metais não ferrosos (SANDVIK 2011).

Tabela 3.1 Classificação conforme a norma ISO para as classes de metal duro (Adaptado de ISO 513:2004)

Principal grupo de usinagem	Cor da identificação	Grupo de aplicação	Operação e condições de usinagem
P Aços maleáveis de cavacos longos	Azul	P01	Torneamento e mandrilamento de precisão, altas velocidades de corte, pequenas seções de cavaco, alta qualidade dimensional, superfícies com bom acabamento sob condições livres de vibrações
		P10	torneamento, copiado, rosqueamento, altas velocidades de corte, pequenas seções de cavaco moderados.
		P20	Torneamento copiado, rosqueamento, velocidades de corte, seções de cavaco moderadas. Aplainamento com pequenas seções de cavaco.
		P30	Torneamento, aplainamento, fresamento, baixas velocidades de corte e grandes seções de cavaco, grandes ângulos de solda, condições desfavoráveis de usinagem.
		P40	Torneamento, aplainamento, fresamento, baixas velocidades de corte e grandes seções de cavaco (desbaste) grandes ângulos de solda, condições desfavoráveis de usinagem. Também para torneamento automático.
		P50	Em processos que exigem grandes solicitações sob o metal duro (Altas tenacidades) torneamento, aplainamento, fresamento, baixas velocidades de corte e grandes seções de cavaco, grandes seções de cavaco, grandes ângulos de saída, condições desfavoráveis de usinagem. também torneamento automático.
M Aço, aço fundido, aço austenítico, aços inoxidáveis	Amarelo	M10	Torneamento, moderados a altas velocidades de usinagem, pequenas e moderadas seções de cavaco.
		M20	Torneamento, fresamento sob moderadas velocidades de corte e seções moderadas de cavaco.
		M30	Torneamento, fresamento, aplainamento, com moderadas velocidades de corte e seções de cavaco moderadas a grandes.
		M40	Torneamento, torneamento de formas, usinagem em cortes interrompidos.
K Ferros fundidos, ferro fundido coquilhado, ferro fundido maleável de cavacos curtos, Aços endurecidos, metais não-ferrosos, materiais não metálicos	Vermelho	K01	Torneamento, fresamento e mandrilamento de precisão, fresamento de acabamento, rasqueteado.
		K10	Torneamento, fresamento, mandrilamento, furação, alargamento, rosqueteamento e brochamento
		K20	Torneamento, fresamento, mandrilamento, furação, alargamento, rosqueteamento e brochamento sob maiores solicitações que do que a K10.
		K30	Torneamento, fresamento, aplainamento, sob condições adversas de usinagem, grandes ângulos de saída.
		K40	Torneamento, fresamento, aplainamento, sob condições adversas de usinagem, grandes ângulos de saída.

A classificação ISO (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION) indica as seguintes categorias para a classificação do metal duro: P, M e K. A norma ISO 513:2004 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION 2004) classifica os metais duros em P, M, K, N, S e H. O tamanho de grão do metal duro pode ser dividido em fino ($0,8\mu\text{m}$ a $1,3\mu\text{m}$), submicrométrico ($0,5\mu\text{m}$ a $0,8\mu\text{m}$), ultrafino ($0,2\mu\text{m}$ a $0,5\mu\text{m}$) e nanométrico (menor que $0,2\mu\text{m}$), sendo que o menor tamanho de grão representa melhores propriedades para o material (DINIZ et al. 2008).

As cerâmicas normalmente são utilizadas na indústria em forma de insertos intercambiáveis. Em diâmetros menores, utiliza-se algumas cerâmicas com nitreto de silício. Em função das características de baixa resistência a torção e a flexão e da dificuldade de afiação não está sendo difundida a utilização (CSELLE 2002). Os materiais superduros podem ser utilizados em furação na forma de insertos intercambiáveis para ferramentas de grandes diâmetros. Particularmente, o CBN é utilizado para a usinagem de materiais duros, mas a vida da ferramenta é extremamente dependente do tipo de material (CASTILLO 2005).

3.10 Aços rápidos

O desenvolvimento dos aços ferramentas foi originado no decorrer da revolução industrial, com o aumento da necessidade de ferramentas que suportassem por mais tempo a sua utilização em serviço (SILVA 2010). O Aumento significativo das propriedades mecânicas após o seu tratamento térmico, podendo alcançar durezas entre 65 HRC e 70 HRC e a capacidade de manter as suas propriedades em altas temperaturas tornaram o aço rápido o material utilizado como matéria prima para ferramentas de usinagem (JESUS 2004).

Os aços ferramentas podem ser classificados pela composição química ou de acordo com a sua aplicação, como pode ser vista na Tabela 3.2. Têm como base aços com alto teor de carbono com a adição de elementos de liga, que proporcionam resistência ao desgaste e tenacidade, combinadas com alta resistência mecânica (JESUS 2004).

Os aços rápidos são normalmente aplicados na fabricação de ferramentas de corte, onde se procuram altas velocidades de corte e grandes avanços. De forma geral, serve como matéria-prima para brocas, fresas, alargadores, serras, ferramentas de torneamento, assim como para matrizes de estampagem. Possuem como característica a dureza em altas temperaturas, a

resistência ao desgaste, a abrasão, a estabilidade dimensional e a boa tenacidade (SILVA 2010; HOYLE 1988; JESUS, 2004; STEMMER 2007).

Tabela 3.2 Classificação de aços ferramentas conforme aplicação (Adaptado de JESUS 2004).

Tipo	Classe	Característica marcante
1 - Temperável em água	W	-
2 - Para trabalho a frio	O	Temperável em óleo
	A	Temperável ao ar – média liga
3 - Resistente ao choque	D	Alto carbono – alto cromo
	S	-
4 - Aço rápido	T	A base de tungstênio
	M	A base de molibdênio
5 - Para trabalho a quente	H	H1~H19: a base de cromo
		H20~H39: a base de tungstênio
		H40~H59: a base de molibdênio
6 - Para a construção de moldes	P	-
7 - Para aplicações especiais	L	Baixa liga
	F	Carbono – tungstênio

Dentre as características principais da sua composição química estão a presença do carbono, para combinação com outros elementos de liga, altas temperaturas de austenitização, alta temperabilidade e endurecimento secundário. Possuem preço elevado devido a sua grande quantidade de elementos de liga. Os altos valores de dureza são alcançados devido à combinação de carbonetos primários e secundários combinando com uma matriz martensítica de alto carbono (SILVA 2010).

3.10.1 Formação dos carbonetos

Os carbonetos primários são formados durante a solidificação, porém não são bem distribuídos ao longo da matriz, mas, com o trabalho a quente após a solidificação, ocorre a sua distribuição. São observados os carbonetos MC, M₂C e M₆C, sendo que para a formação de carbonetos MC é necessária a presença de vanádio, carbono e nitrogênio, para a formação do M₂C há necessidade da presença do molibdênio e para os carbonetos M₆C o tungstênio e o silício são os elementos formadores (SILVA 2010).

A microestrutura dos aços rápidos tem como composição básica, após seu tratamento térmico, a presença de carbonetos primários em uma matriz de martensita revenida com carbonetos precipitados durante o processo de revenimento (JESUS 2004).

A classificação dos aços rápidos feita pela AISI (AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE) e pela SAE (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS) pode ser observada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, sendo possível identificar os principais tipos de aços rápidos utilizados na indústria, subdivididos pela sua composição química.

A classe de aços rápidos ao tungstênio (W) tem a capacidade de combinar boa resistência ao choque, dureza a quente e custo, sendo o T1 o tipo mais utilizado. A adição de cobalto, apesar de reduzir a tenacidade, aumenta a dureza a quente e a resistência ao revenido (SILVA 2010).

Os aços rápidos da série M apresentam molibdênio, tungstênio, cromo e vanádio na sua composição química. Possuem desempenho semelhante aos aços da série T, com maior tenacidade para menores níveis de dureza e menor custo. Alguns aços desta série com adição de cobalto, têm aplicação restrita, devido a pouca disponibilidade deste elemento (SILVA 2010; JESUS 2004).

O aço rápido AISI M2 é considerado um aço universal, em função de sua utilização abranger a maioria dos campos de atuação dos aços rápidos. Tem como característica a substituição do tungstênio pelo molibdênio, em função de seu peso molecular, com 1% de molibdênio, ter praticamente o mesmo efeito que 1,8% de tungstênio (HOYLE 1988; SILVA 2010).

Tabela 3.3 Composição química de aços rápidos (Adaptado de ASTM A 600 1993).

Composição (% peso)									
AISI	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Co
T1	0,65-0,80	0,10-0,40	0,20-0,40	3,75-4,50	0,30 máx.	-	17,25-18,75	0,90 - 1,30	-
T2	0,80-0,90	0,20-0,40	0,20-0,40	3,75-4,50	0,30 máx.	1,00 máx.	17,50-19,00	1,80-2,40	-
T4	0,70-0,90	0,10-0,40	0,20-0,40	3,75-4,50	0,30 máx.	0,40-1,00	17,50-19,00	0,80-1,20	4,25-5,75
T5	0,75-0,85	0,20-0,40	0,20-0,40	3,75-4,50	0,30 máx.	0,50-1,25	17,50-19,00	1,80-2,40	7,00-9,50
T6	0,75-0,85	0,20-0,40	0,20-0,40	4,00-4,75	0,30 máx.	0,40-1,00	18,50-21,00	1,50-2,10	11,00-13,00
T15	1,50-1,60	0,15-0,40	0,15-0,40	3,75-5,00	0,30 máx.	1,00 máx.	11,75-13,00	4,50-5,25	4,75-5,25
M1	0,78-0,88	0,15-0,40	0,20-0,40	3,50-4,00	0,30 máx.	8,20-9,20	1,40-2,10	1,00-1,35	-
M2	0,78-1,05	0,15-0,40	0,20-0,45	3,75-4,50	0,30 máx.	4,50-5,50	5,50-6,75	1,75-2,20	-

Na Tabela 3.4 são observadas suas classificações e nomenclaturas, considerando as diferentes definições para o material, no âmbito internacional (JESUS 2004).

O processo de desenvolvimento dos aços rápidos contempla basicamente dois grupos de materiais, sendo os aços rápidos padrão, utilizados em quase todas as condições de corte, desde as leves até as mais severas, e outro grupo chamado de aços rápidos intermediários, com menores teores de elementos de liga, que resultam em condições de corte satisfatórias para corte leve até moderado. O tungstênio equivalente pode ser considerado para a classificação do aço rápido em função do teor de elementos de liga formadores de carbonetos presentes, podendo ser dimensionada a dureza a quente do material. Esta classificação pode ser observada na Tabela 3.5 (ARAÚJO 1993).

Tabela 3.4 Designação para o aço AISI M2 para diversos países (Adaptado de JESUS 2004).

NORMA (ORIGEM)	DESIGNAÇÃO
DIN ^[23] (Alemanha)	S 6-5-2 HS6-5-2
W.-Nr. ^[23] (Alemanha)	1.3343
AFNOR ^[23] (França)	HS6-5-2 Z 85WDCV06-05-04-02
B.S. ^[23] (Grã-Bretanha)	BM 2
UNI ^[23] (Itália)	HS 6-5-2
JIS ^[23] (Japão)	SKH 51
SS ^[23] (Suécia)	2722
GOST ^[23] (Rússia)	(R6AM5) R6M5
UNE ^[23] (Espanha)	F.5603 6-5-2
AISI/SAE ^[16, 17, 21, 23] (USA)	M2
ASTM ^[17] (USA)	650
UNS ^[21] (*)	T11302

(*) Designação estabelecida de acordo com a prática E-527 e SAE J 1086.

Tabela 3.5 Classificação dos aços rápidos em função dos elementos de liga - Verificação do tungstênio equivalente (Adaptado de ARAÚJO 1993)

	Standard	Intermediário
Conteúdo mínimo dos principais elementos	(% peso)	(% peso)
Carbono	0,65	0,7
Cromo	3,5	3,25
Vanádio	0,8	0,8
Tungstênio + 1.8xMolibdênio	11,75	6,5
Teor mínimo de elementos de liga baseado no "tungstênio equivalente : (1/3 Cr + 6.2 V + W + 1.8 Mo)		
Aços com menos de 5% de cobalto	22.50	13.00
Aços com mais de 5% de cobalto	21.00	12.00
Requisitos de resposta a têmpera		
Capacidade de ser austenitizado, temperado e revenido a uma temperatura não inferior a 510°C, com obtenção de tamanho de grão Snyder-graff mínimo de 8 e dureza igual ou superior a:	63 HRc	62 HRc

3.10.2 Efeitos dos elementos de liga nos aços rápidos

A presença dos elementos de liga promove o aumento da resistência mecânica e da dureza nos aços recozidos, devido à promoção do endurecimento da ferrita por solução sólida, pelo aumento do número de partículas finas de carbonetos distribuídos na estrutura produzindo o endurecimento por dispersão, a fina granulação da ferrita e pela mudança na forma dos carbonetos de liga (SILVA 2010).

A influência do cromo nos aços rápidos se caracteriza pelo aumento da temperabilidade, da resistência ao desgaste, da resistência à corrosão e oxidação e da resistência a altas temperaturas. O manganês tem a capacidade de balancear a fragilidade causada pela presença residual de enxofre. O silício tem efeito desoxidante e de aumento da resistência à oxidação (CHIAVERINI 1990).

O cobalto tem como grande vantagem o aumento da resistência a quente do material, facilitando a usinagem em altas temperaturas. Porém, tem a tendência de promover a formação de grandes quantidades de austenita retida (JESUS 2004).

O vanádio eleva a temperatura de crescimento do grão austenítico, promovendo o refino de grão e aumento de temperabilidade, garante o aumento da resistência ao revenido, facilitando o endurecimento secundário. Tem a capacidade de aumentar o rendimento de corte nos aços rápidos. Deve ser aumentado o teor de carbono conforme ocorre o aumento do seu

percentual, para que não cause queda de dureza no aço rápido (CHIAVERINI 1990; BLICKWEDE 1949).

O molibdênio eleva a temperatura de crescimento do grão austenítico, aumenta a temperabilidade e a dureza a quente e promove a redução na tendência de fragilidade ao revenido. Forma carbonetos com ferro e carbono do mesmo tipo que o tungstênio. Tem como desvantagem a tendência à descarbonetação, necessitando um melhor controle dos parâmetros de tratamento térmico (JESUS 2004; CHIAVERINI 1990).

O tungstênio causa elevado endurecimento secundário, aumenta a resistência ao revenimento, forma partículas duras e resistentes ao desgaste e promove dureza em altas temperaturas. Os carbonetos primários formados pelos aços rápidos constituem em torno de 25 a 30% do volume, sendo três tipos principais, o $M_{23}C_6$, M_6C e o MC (CHIAVERINI 1990). Os elementos de liga, de forma geral, tem a característica de promover uma maior resistência ao revenido, como o W e o Mo, que após ser dissolvido na austenita, resiste a precipitação por temperaturas maiores. O V também contribui para a maior resistência a altas temperaturas (JESUS 2004).

3.11 Tratamento térmico do aço rápido

As propriedades finais atingidas pelos aços ferramenta, que são a alta dureza e a durabilidade em condições de trabalho severas, resultam dos processos de austenitização, formação martensítica e revenimento. O endurecimento de aços ferramentas consiste nas etapas de pré-aquecimento, austenitização, resfriamento e revenimento, com o objetivo de promover a microestrutura martensita revenida (KRAUSS 1990).

3.11.1 Pré – aquecimento

A fase de pré-aquecimento tem como objetivo evitar choques térmicos e reduzir tensões associadas a transformação de microestrutura. Em banho de sal, ocorre a redução da indução de trincas, diminuindo o tempo de aquecimento e reduzindo a tendência à descarbonetação. A diminuição da possibilidade de empenamento, de fissuração do material e a prevenção de descarbonetação são vantagens devido a realização do pré-aquecimento. A temperatura recomendada para o pré-aquecimento está em torno de 760° , porém, em alguns casos, pode ser realizado um duplo pré-aquecimento, o primeiro entre 540° e 650° e o segundo entre 845° e 870° (KRAUSS 1990; JESUS 2004; SILVA 2010).

3.11.2 Recozimento

O objetivo do recozimento é montar uma microestrutura uniforme e consistente de carbonetos dispersos na matriz ferrítica, sendo importante para o refinamento do grão causado pelo trabalho a quente sofrido pelo material. Este processo pode ser realizado por recozimento pleno, com austenitização e conseqüente lento resfriamento, bem como por recozimento subcrítico ou isotérmico, dentro da faixa de 740°C a 780°C (SILVA 2010; KRAUSS 1990). Na Tabela 3.6 podem ser observadas as durezas alcançadas com os tratamentos térmicos, as temperaturas de recozimento, de têmpera, de revenido e os meios de resfriamento.

Tabela 3.6 Temperaturas, propriedades e meios de resfriamento para aços rápidos (Adaptado de CHIAVERINI 1990).

Tipo	AISI	Dureza de trabalho inicial (HRC)	Dureza superficial após têmpera (HRC)	Temperatura de tratamento térmico (°C)			
				Recozimento	Têmpera	Meios de resfriamento	Revenido (Faixa)
610	T1	63 a 65	64 a 66	871/899	1260/1302	Sal, Óleo , ar	538/593
611	T2	63 a 66	65 a 67	871/899	1260/1302	Sal, Óleo , ar	538/593
612	-	63 a 66	65 a 67	871/899	1260/1302	Sal, Óleo , ar	538/593
613	-	63 a 66	65 a 67	871/899	1246/1274	Sal, Óleo , ar	538/593
614	T3	63 a 66	64 a 66	871/899	1246/1274	Sal, Óleo , ar	538/593
615	T9	63 a 67	65 a 67	871/899	1246/1274	Sal, Óleo , ar	538/593
616	T7	63 a 65	65 a 67	871/899	1260/1288	Sal, Óleo , ar	538/593
620	T4	63 a 65	63 a 66	871/899	1260/1302	Sal, Óleo , ar	538/593
621	T5	63 a 65	64 a 66	871/899	1274/1302	Sal, Óleo , ar	538/593
622	T6	63 a 65	64 a 66	871/899	1274/1302	Sal, Óleo , ar	538/593
623	T15	64 a 66	65 a 68	871/899	1204/1260	Sal, Óleo , ar	538/649
624	T8	63 a 65	64 a 66	871/899	1260/1302	Sal, Óleo , ar	538/593
630	M1	63 a 65	64 a 66	815/871	1177/1218	Sal, Óleo , ar	538/593
631	M10	63 a 65	64 a 66	815/871	1177/1218	Sal, Óleo , ar	538/593
632	M7	63 a 65	64 a 66	815/871	1177/1218	Sal, Óleo , ar	538/593
640	M30	63 a 65	64 a 66	871/899	1204/1232	Sal, Óleo , ar	538/593
641	M34	63 a 65	64 a 66	871/899	1204/1232	Sal, Óleo , ar	538/593
642	-	63 a 66	62 a 65	843/871	1107/1149	Sal, Óleo , ar	538/566
643	-	63 a 66	62 a 65	843/871	1107/1149	Sal, Óleo , ar	538/566
644	M33	63 a 65	64 a 66	871/899	1204/1232	Sal, Óleo , ar	538/593
645	M42	66 a 70	63 a 65	871/899	1163/1190	Sal, Óleo , ar	510/593
646	M43	66 a 70	63 a 65	871/899	1149/1177	Sal, Óleo , ar	510/593
647	M46	66 a 69	63 a 65	871/899	1190/1218	Sal, Óleo , ar	524/566
648	M47	66 a 70	63 a 65	871/899	1177/1204	Sal, Óleo , ar	524/593
650	M2	63 a 65	64 a 66	871/899	1190/1218	Sal, Óleo , ar	538/593
651	M3	63 a 66	64 a 66	871/899	1204/1232	Sal, Óleo , ar	538/593
652	M3	63 a 66	64 a 66	871/899	1204/1232	Sal, Óleo , ar	538/593
653	M4	63 a 66	65 a 67	871/899	1204/1232	Sal, Óleo , ar	538/593
654	M8	63 a 65	64 a 66	843/871	1204/1232	Sal, Óleo , ar	538/593
660	M35	63 a 65	64 a 66	871/899	1218/1246	Sal, Óleo , ar	538/593
661	M36	63 a 65	64 a 66	871/899	1218/1246	Sal, Óleo , ar	538/593
662	M6	63 a 66	63 a 65	871	1177/1204	Sal, Óleo , ar	538/593
663	M15	64 a 68	65 a 68	871/899	1190/1232	Sal, Óleo , ar	538/649
664	-	63 a 67	64 a 66	871/899	1218/1260	Sal, Óleo , ar	538/593
665	M41	66 a 70	63 a 65	871/899	1190/1215	Sal, Óleo , ar	538/593
666	M44	66 a 70	63 a 65	871/899	1200/1227	Sal, Óleo , ar	538/627
667	M45	66 a 70	63 a 65	871/899	1204/1232	Sal, Óleo , ar	538/593
668	-	66 a 70	61 a 63	871	1190/1204	Sal, Óleo	538/593
669	-	66 a 70	63 a 64	871	1190/1204	Sal, Óleo	538/593
670	-	65 a 68	-	850/899	1100/1200	Sal, Óleo , ar	538/593
671	-	64 a 69	-	850/899	1100/1190	Sal, Óleo , ar	549/593

O tratamento térmico de recozimento é importante para a redução das tensões decorrentes de processos de resfriamentos de trabalho a quente e para a recuperação da ductibilidade dos aços rápidos, sendo de extrema importância para a realização do processo de usinagem (HOYLE 1988).

Tem como microestrutura característica uma matriz ferrítica com carbonetos distribuídos. O tamanho de grão sofre grande influência em relação as temperaturas de austenitização, como pode ser percebido na Tabela 3.7 onde se observam tamanhos de grão Snyder-Graff diferentes para cada temperatura de austenitização para mesmos aços rápidos (CHIAVERINI 1990).

Tabela 3.7 Influência da temperatura de austenitização no tamanho de grão do aço rápido recozido (Adaptado de HOYLE 1988).

	Temperatura de austenitização	Snyder-Graff Tamanho de grão	Dureza (HV)
Temperatura de recozimento 900/712	1150	21	715
	1190	19	765
	1230	14	802
	1270	12	835
Temperatura de recozimento 900/752	1150	24	718
	1190	22	770
	1230	20	800
	1270	16	835
Temperatura de recozimento 900/798	1150	31	715
	1190	28	768
	1230	26	800
	1270	25	840
Transformação no recozimento 890/775	1250	21	820
	1270	18	840
	1290	11	780
	1250	16	825
Sem recozimento especial	1270	13	835
	1290	3	785
Aço M2 Temperatura de recozimento de 730	1205	30	-
Recozimento isotérmico 870	1205	13	-

3.11.3 Têmpera

Nos aços rápidos, para que seja promovido o endurecimento, deve-se promover a solução de grande quantidade de carbonetos na austenita, tendo um reduzido tamanho de grão para que se tenha uma boa tenacidade e que as condições químicas superficiais sejam preservadas (JESUS 2004).

As condições de austenitização vão indicar a quantidade de carbono e elementos de liga em solução e influenciar nos resultados da têmpera. Possui grande importância na obtenção de uma matriz martensítica com carbonetos dispersos na microestrutura, onde a retenção de carbonetos se torna importante para o controle do tamanho de grão. O resfriamento pode ser realizado ao ar, óleo ou banho de sal (SILVA 2010; KRAUSS 1990).

A microestrutura de um aço AISI M2 temperado pode ser visualizado nas micrografias da Figura 3.19, onde se observam diferentes tamanhos de grão conforme ocorre o aumento da temperatura de austenitização utilizada, desde 1165°C até 1240 °C, formando um tamanho de Grão ASTM 17 até ASTM 8 (CHANDLER 1994).

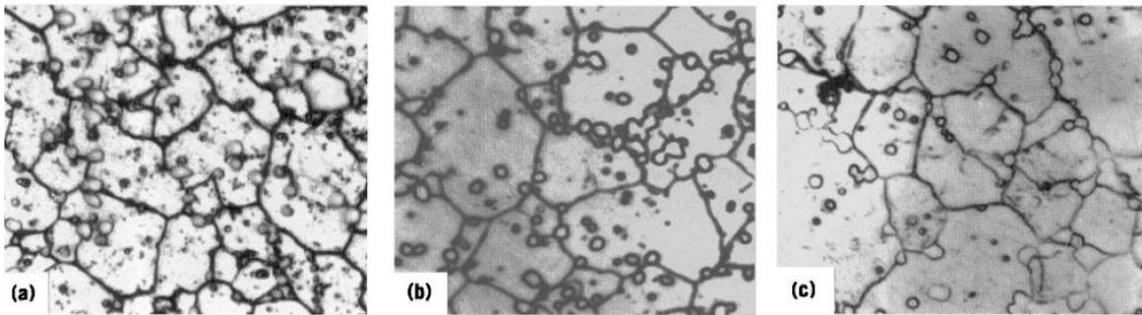


Figura 3.19 AISI M2: Microestruturas. A) Nital 10%, 1000x. 22,33mm (0,875in.) diâmetro da barra, austenitizado a 1165°C (2125°F) e resfriado em óleo. Partículas de carbonetos esferoidais em martensita não revenida. Tamanho de grão ASTM 17. (b) Nital 10%, 1000x. Mesmo aço que (a), austenitizada a 1210 °C (2210°F). Tamanho de grão aumentado para 12 devido a alta temperatura de austenitização. Nital 10%, 1000x. Mesmo aço que (a), mas austenitizado a 1240°C (2260°F), resultado do incremento do tamanho de grão para 8 (Adaptado de CHANDLER 1994).

Na etapa de resfriamento a recomendação é a utilização de banho de sais mantido a uma temperatura acima da M_i , onde se deseja a uniformização da temperatura seguida pelo resfriamento ao ar. Com o aumento da temperatura de aquecimento, nos aços rápidos com carbono elevado, pode ser observado o desaparecimento da ferrita na solução de carbonetos (CHIAVERINI 1990).

Em temperaturas normais de austenitização os aços rápidos contêm entre 7% e 12,5% de excesso de carbonetos. O diagrama de transformação isotérmica do aço AISI M2, mostrado na Figura 3.20, pode ser considerado comum aos outros aços rápidos na questão de características de resfriamento e transformação de fase (HOYLE 1988).

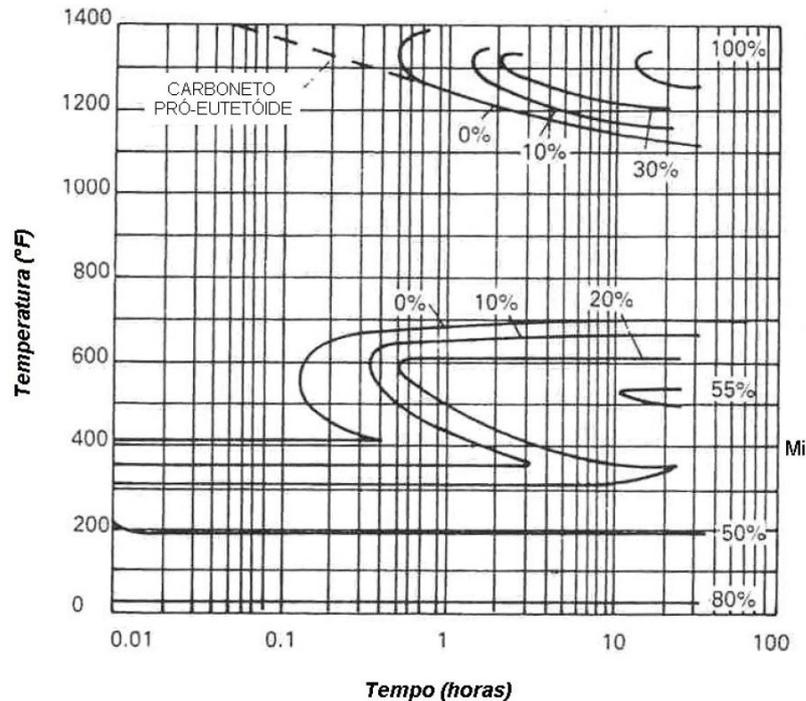


Figura 3.20 Diagrama TTT para o aço rápido AISI M2 (Adaptado de HOYLE 1988).

3.11.4 Revenimento

O processo de revenimento é extremamente importante em aços ferramenta para que se aumente a tenacidade das peças. Entretanto, para a obtenção destas características, devem ser feitos duplos ou triplos revenimentos. O revenimento promove a transformação da austenita retida em ferrita e cementita durante o revenimento e o duplo revenimento tem a função de transformar a austenita que se transformou em martensita com o primeiro revenimento em martensita revenida (KRAUSS 1990; CHIAVERINI 1998).

O revenimento deve ser realizado após a têmpera, reduzindo a presença de austenita retida. A Figura 3.21 mostra o endurecimento secundário devido as temperaturas de revenimento e a influência das temperaturas de austenitização do material, sendo 1220°C a temperatura onde se obtém as maiores faixas de dureza secundária após o revenimento. O endurecimento secundário ou por precipitação acontece em torno de 550°C, após 90 minutos. Acima desta temperatura ocorre a redução da dureza (SILVA 2010; HOYLE 1988).

Segundo Chiaverini (1990) o processo de revenimento pode ser dividido em 4 estágios:

- 1º estágio: Ocorre a queda da dureza. A martensita tetragonal decompõe-se em martensita cúbica, como rejeição de uma fase de carboneto extremamente fino, que após desaparece com o aparecimento da cementita. Ocorre até 400°C;
- 2º estágio: Ocorre a redissolução de parte da cementita e a precipitação de carboneto de liga M_2C , com o endurecimento por precipitação;
- 3º estágio: Ocorre a transformação da austenita retida no resfriamento a partir da temperatura de revenido, provavelmente precedida de uma precipitação de carbonetos de liga na cementita;
- 4º estágio: Ocorre a redissolução de M_2C e solução final de do carboneto M_3C , com simultânea precipitação e coalescimento dos carbonetos M_6C e $M_{23}C_6$. Associado ao amolecimento devido a temperaturas de revenimento maiores que 650°C.

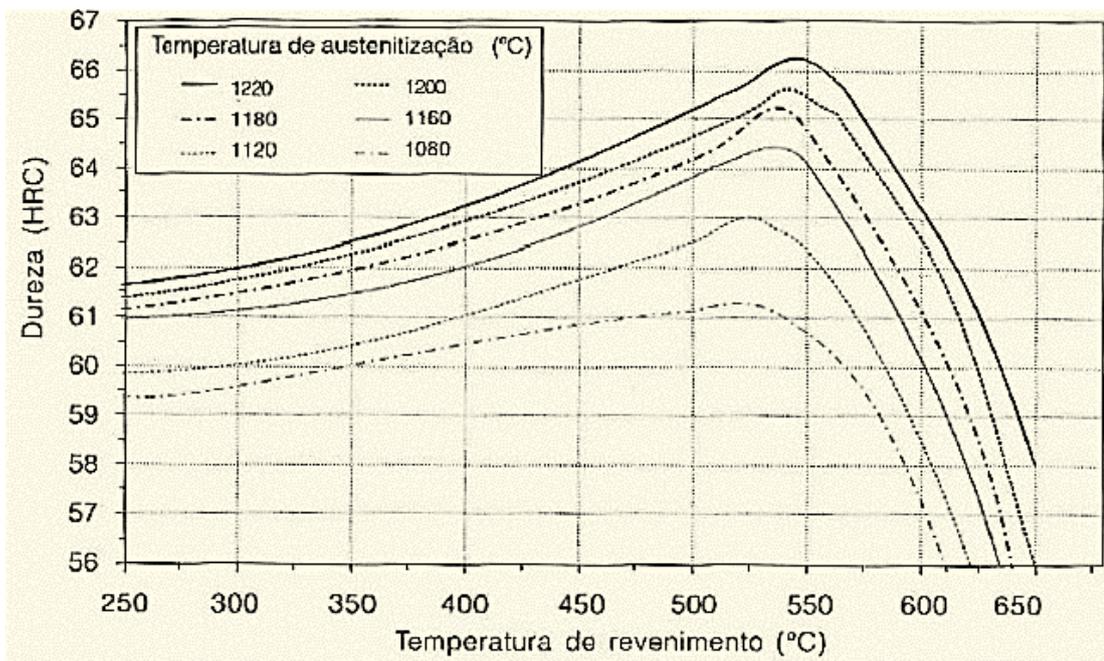


Figura 3.21 Curva de revenimento do aço AISI M2 (Adaptado de SILVA 2010).

Na Figura 3.22 pode ser visualizado o percentual de carbono não dissolvido durante a austenitização para o tratamento térmico de têmpera. O processo completo de tratamento térmico que passa o aço rápido está representado na Figura 3.23, onde se verifica, de forma geral, os ciclos de aquecimento e resfriamento que o aço sofre para atingir as suas propriedades mecânicas (HOYLE 1988).

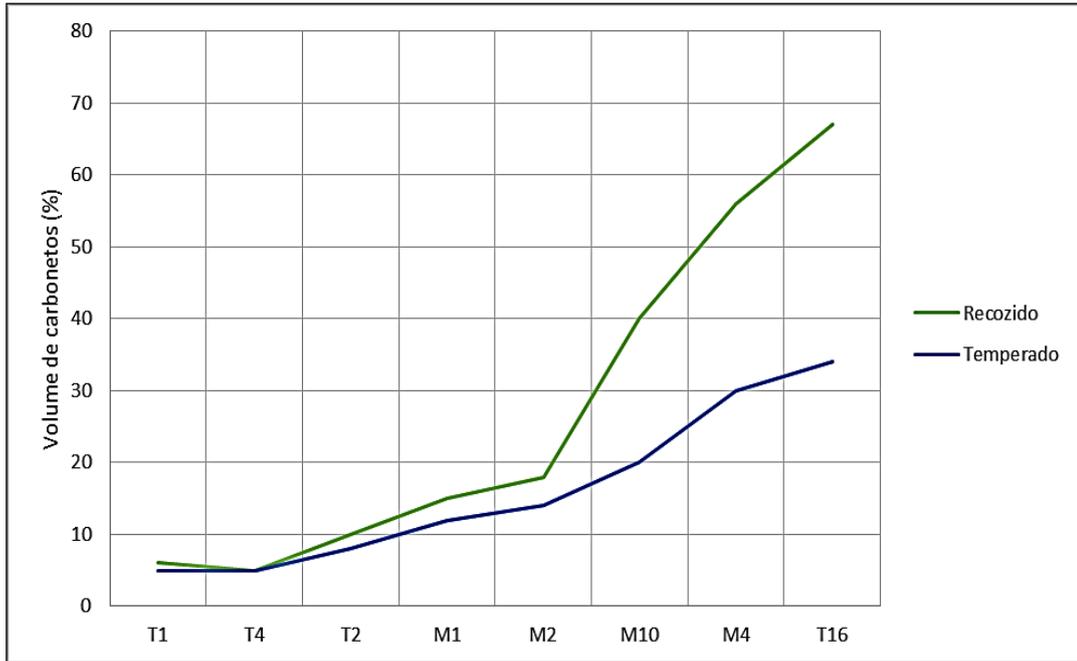


Figura 3.22 Volume, em porcentagem, do carboneto total que existe como carboneto de vanádio em aços rápidos nas condições recozidos e temperados (Adaptado de CHIAVERINI 1990).

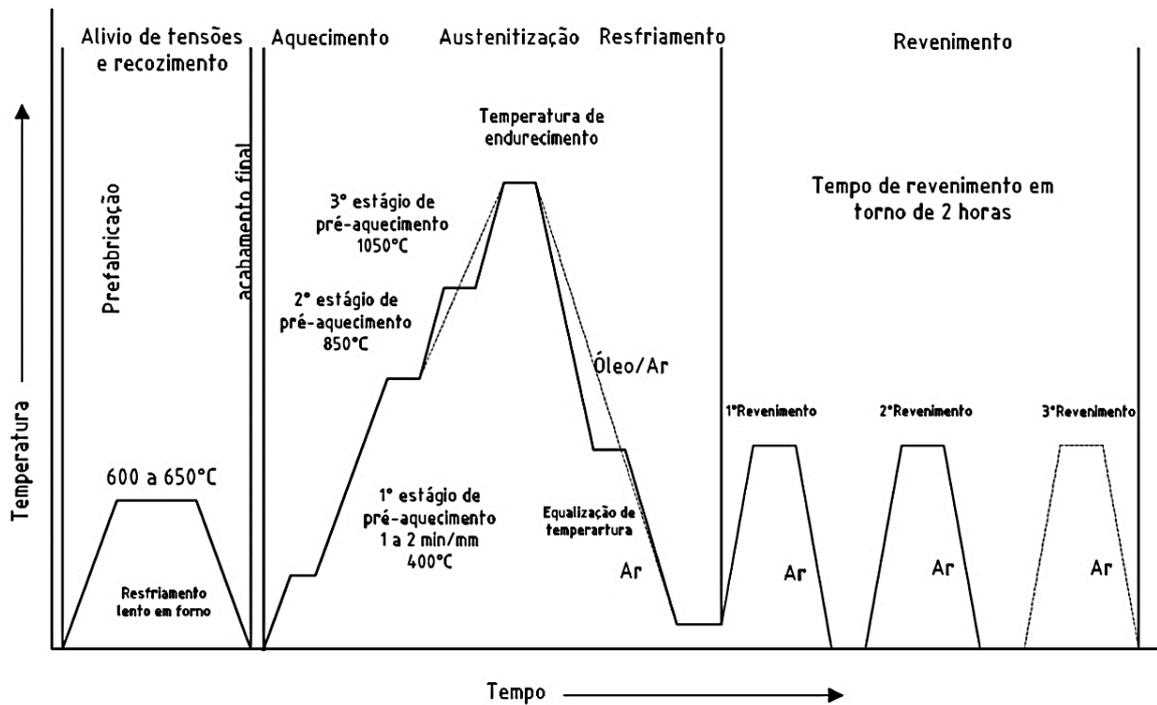


Figura 3.23 Ciclo de tratamento térmico de aços rápidos (Adaptado de HOYLE 1988).

3.11.5 Banho de Sal

O tratamento térmico em banho de sal pode ser considerado um método rápido, uniforme, eficiente, econômico e extremamente adaptado ao tratamento térmico de ligas ferrosas, tanto para nitretação líquida, carbonitretação, austêmpera, martêmpera e processos de revenimento. Para que possa ser obtida a temperatura de equilíbrio de um corpo de prova com diâmetro 25 mm, em um forno em banho de sal, se necessita em torno de 4 min. Um forno de radiação necessita de 20 a 30 minutos para a mesma peça. Dentre os benefícios da sua utilização estão a proteção superficial contra a descarbonetação e o controle de distorção das peças (ASM 1992).

As especificações das faixas de temperatura dos sais utilizados em fornos de banho de sal estão relacionadas com as temperaturas de fusão dos sais, sendo que devem ser selecionados para cada necessidade ou aplicação (MILITARY SPECIFICATION 1977).

No processo de banho de sais não ocorre a reação de oxidação na interface metal/banho não gerando descarbonetação nas peças. Dentre as desvantagens da utilização estão os vários fornos necessários em função das temperaturas fixas de utilização, as difíceis instalações para o processo, potencialmente poluentes em relação a contaminação das águas usadas na limpeza das peças, risco de distorções, descarbonetação devido a exposição das peças durante a movimentação, a limpeza, que deve ser efetiva para que não seja promovida corrosão e a heterogeneidade do aquecimento das peças, em função das diferentes taxas de resfriamento/aquecimento no processo. O processo pode ser observado na Figura 3.24-a e também na figura Figura 3.24-b, com a peça sendo movimentada durante o tratamento térmico (YOSHIDA 2007).



Figura 3.24 A) Peça em fase final de têmpera. B) Peça sendo movimentada (Adaptado de YOSHIDA 2007).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo do trabalho serão apresentados os equipamentos, materiais e métodos utilizados na realização dos ensaios e na obtenção dos resultados.

4.1 Análise da Composição química das ferramentas e caracterização dos materiais

A partir dos diâmetros de barras disponíveis para a realização dos tratamentos térmicos para a fabricação das brocas, foram realizados ensaios para a caracterização dos materiais, o aço AISI M2 e o aço Z2.

A caracterização inicial foi realizada no estado recozido via preparação metalográfica para verificação da distribuição de carbonetos, segundo a norma DIN SEP 1615 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 1975) e a verificação da composição química via espectrometria óptica, realizada com equipamento disponível no Laboratório de Materiais – LABMAT, do centro de pesquisas da SGS, em Piracicaba, São Paulo.

4.2 Usinagem das ferramentas

A usinagem das brocas foi realizada nos equipamentos disponíveis na empresa com o objetivo de atingir os valores dimensionais mostrados na Tabela 4.1, indicados pelas normas DIN 338 e DIN ISO 1414-1.

Durante a realização da usinagem das ferramentas foram utilizados os mesmos equipamentos e iguais parâmetros de corte para a fabricação dos lotes de amostras.

Tabela 4.1 Especificação dimensional das brocas usinadas.

Medida	Especificação	
Diâmetro(mm)	6,328	6,35
Diâmetros detalonado (mm)	5,892	5,994
Comprimento do canal (mm)	63	65
Comprimento total (mm)	100,5	101,5
Espessura de núcleo (mm)	1,168	1,27
ângulo da ponta (°)	115	121
Ângulo de alívio (°)	10	14
Ângulo da Aresta Transversal (°)	125	135
Ângulo de Hélice (°)	27	31
Batimento (mm)	0	0,18
Largura de Guia (mm)	0,4572	0,5588
Conicidade Núcleo (mm/mm)	1,5 : 100mm = 0,015 mm/mm	

A etapa de abertura de canal pode ser visualizada no ponto 1 da Figura 4.1. O equipamento para a realização da detalonagem pode ser visualizada no ponto 2 da Figura 4.1. A máquina para afiação pode ser observada no ponto 3 na Figura 4.1. A realização da usinagem nos mesmos equipamentos foi para garantir as mesmas condições de lubrificação e desgaste de rebolo de retifica, diminuindo as possibilidades de queimas nas amostras e garantindo uma baixa variação dimensional, de acordo com a especificação.

**Figura 4.1 Célula de produção para a usinagem das brocas de aço rápido.**

Os equipamentos utilizados para a verificação dimensional das brocas usadas nos ensaios são apresentados nas próximas figuras. Na Figura 4.2 se observa o suporte e o gabarito utilizado para o posicionamento das brocas. A leitura é realizada com uma lente de

aumento de 4,5x e a verificação das medidas foi realizada com o programa Metric. Na Figura 4.3-a pode ser visualizado o paquímetro analógico, marca mitutoyo com resolução de 0,02mm e na Figura 4.3-b o micrômetro digital, marca mitutoyo, com resolução de 0,001mm.



Figura 4.2 Suporte para verificação dimensional de brocas.



Figura 4.3 a) Paquímetro utilizado na verificação dimensional. b) Micrômetro utilizado na verificação dimensional.

4.3 Realização dos revestimentos

O processo de aplicação do revestimento de TiN foi realizado pela empresa Oerlikon Balzers, em seu processo padrão em forno industrial, em conjunto com outras brocas oriundas do processo de fabricação. O processo utilizado pela fornecedora foi por evaporação catódica,

porém, maiores informações não foram disponibilizadas pela empresa, devido a preservação da confidencialidade do seu processo.

4.4 Ensaios de adesão do revestimento

O ensaio de adesão do revestimento foi realizado conforme a VDI 3198. Os corpos de prova foram retirados da haste das brocas, próximo ao canal da ferramenta. Após, foi realizada a usinagem, a retifica e o polimento das faces dos corpos de prova e encaminhados para a empresa Oerlikon Balzers para a aplicação do revestimento, no mesmo lote que os revestimentos aplicados sobre as brocas. Os corpos de prova com as indentações podem ser observados na Figura 4.4. A medição comparativa foi realizada no microscópio do marca LECO, disponível no laboratório metalúrgico da empresa, com 100x de aumento.



Figura 4.4 Corpos de prova para ensaio de adesão dos revestimentos.

Para o teste de indentação o equipamento utilizado foi o duromêtro Rockwell marca mitutoyo com indentador de 120° e verificação automática de dureza nas escalas Rockwell A, B, C, D, E, F, G, H, K, N e T e Rockwell superficial. O equipamento pode ser visualizado na Figura 4.5:



Figura 4.5 Durômetro Rockwell para realização do teste de indentação.

Para complementar a verificação da aderência da camada de TiN sobre os substratos de AISI M2 e Z2, foi realizado o teste de riscamento, utilizando um Tribômetro óptico, marca CETR modelo UMT1, que opera com um sistema de cargas de 1 a 100N. O teste é realizado com ponta de diamante com raio de curvatura de 200 micrometros. O equipamento está localizado no Laboratório de Materiais e Engenharia de Superfície do INPE e pode ser observado na Figura 4.6.

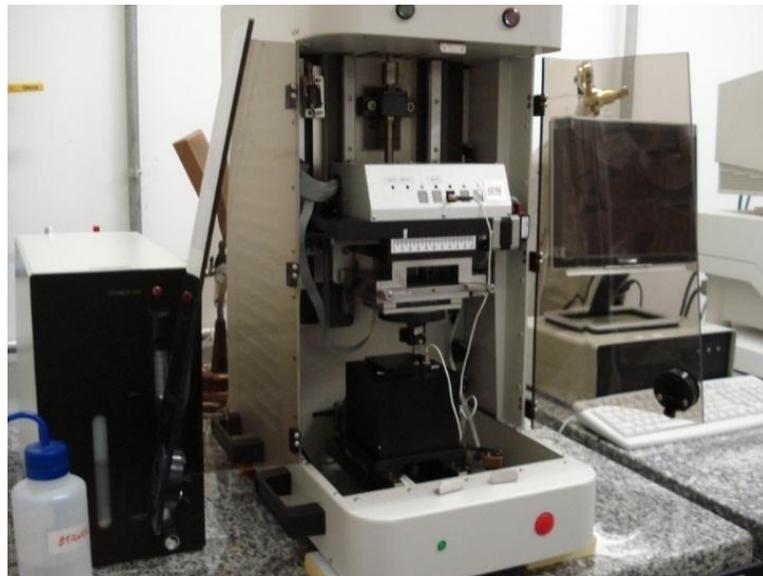


Figura 4.6 Tribômetro utilizado para teste de riscamento das amostras.

Para a verificação das durezas em escala Vickers foi utilizado um microdurômetro marca LECO modelo M400-HV1 com capacidade de carga de 1KN e capacidade de aumento de 600x. O equipamento pode ser observado na Figura 4.7.



Figura 4.7 Microdurômetro Vickers utilizado nos ensaios de dureza.

4.5 Realização dos ensaios de furação

Os ensaios de furação foram realizados com um centro de usinagem 3 eixos Mazak Smart VCS 430A com capacidade de rotação máxima de 12000 rpm, velocidade de corte máxima de 42 m/min, velocidade de avanço de até 8000 mm/min, pressão do fluido de corte de 71 psi e potência do eixo árvore de 18,5 KW. O equipamento foi fabricado em 2011 e pode ser visualizado na Figura 4.8. O programa de furação foi realizado utilizando o CAM da própria máquina considerando as dimensões do material disponível:



Figura 4.8 Centro de usinagem vertical utilizado nos ensaios de furação.

Para a verificação de dureza Brinell dos corpos de prova em aço SAE 1045 foi utilizado o durômetro Brinell marca Fixo-Test modelo 737 com carga de 187,5 kgf. A esfera utilizada possui diâmetro de 2,5mm. O equipamento pode ser visualizado na Figura 4.9.



Figura 4.9 Equipamento para teste de dureza Brinell.

Na Figura 4.10 pode ser observado o plano elaborado para o teste de furação, com o objetivo de maximizar o número de furos realizados no bloco. As dimensões do bloco foram 160 mm x 115 mm x 25,4 mm. O programa de furação foi elaborado para a broca com diâmetro de 1/4" e a distância entre centros de furos foi de 7,35 mm.

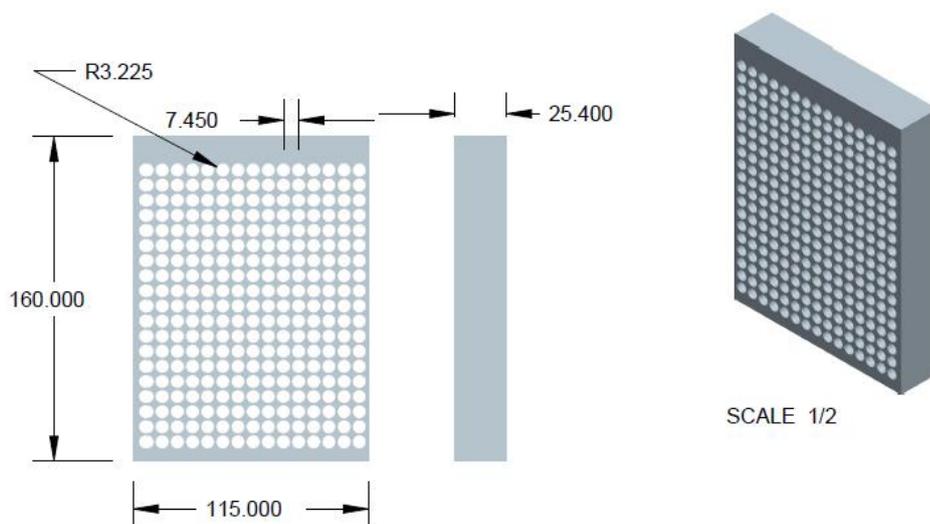


Figura 4.10 Plano de furação realizado nos ensaios de furação.

Durante o ensaio de furação, algumas condições ficaram fixas, como o diâmetro da ferramenta utilizado (6,35mm), a utilização de emulsão direta do fluido de corte com pressão de 71 psi, a furação realizada sem pré-furo com profundidade de 25,4mm e os blocos em aço SAE 1045 com dureza entre 170 HB e 200 HB no estado recozido.

4.6 Medição do desgaste das brocas

O equipamento utilizado para a aquisição das imagens durante o acompanhamento do desgaste de flanco das brocas foi desenvolvido pela empresa e possui visualização com aumento óptico de até 40x. O ponto de referência utilizado como base para o monitoramento do desgaste está expresso na Figura 4.11, com a referência sendo tomada a partir de uma série de indentações realizadas sobre o ângulo de alívio da ferramenta, e a medição do desgaste $Vb_{médio}$ sendo realizado a partir do ponto marcado.



Figura 4.11 Imagem para a verificação do desgaste de flanco das amostras nos testes de furação.

A verificação do desgaste foi realizada ao completar cada ciclo de 45 furos, sendo a peça retirada e realizada a verificação da progressão do desgaste. Após, a peça era novamente acoplada no centro de usinagem para a continuidade do ensaio. Caso o desgaste ultrapassasse 0,2mm ou fosse observada uma falha catastrófica da ferramenta, o processo de furação era prontamente interrompido.

Após a execução dos ensaios de furação foram gerados gráficos para o número de furos realizados quando atingido o critério de desgaste $Vb_{médio}=0,2mm$. Os gráficos foram dispostos em função dos parâmetros de corte utilizados nos ensaios. Foram realizadas

imagens do processo de furação e acompanhamento do desgaste ao longo dos testes de furação.

Para a avaliação microestrutural dos materiais de trabalho, foi utilizado um microscópio óptico marca LEICA modelo EC3 com capacidade de aumento de 1000x com câmera acoplada para a coleta de imagens. O equipamento pode ser observado na Figura 4.12.



Figura 4.12 Microscópio óptico utilizado nas verificações metalográficas.

4.7 Medição da rugosidade dos furos

Para a coleta de dados de rugosidade foi utilizado um rugosímetro portátil marca Mitutoyo modelo SJ-400 com verificações nos parâmetros R_a e R_z . O cut-off selecionado para a verificação da rugosidade dos furos foi de 0,8mm. A verificação da rugosidade foi realizada no primeiro e no último furo. O equipamento pode ser observado na Figura 4.13:



Figura 4.13 Rugosímetro linear digital.

4.8 Medição do diâmetro dos furos

A medição do diâmetro dos furos foi realizada com um micrômetro interno de três pontas com faixa de medição de 6,00mm a 8,00mm e precisão de 0,001mm. As medições foram realizadas para cada uma das 16 condições de teste, sendo efetuadas nos furos 1, 90, 180 e 270, sempre que possível, que correspondem, respectivamente, a 25,4mm, 2286mm, 4572mm e 6858mm de comprimento usinado. As medidas foram realizadas no início, no meio e no final da profundidade da perfuração.

4.9 Determinação dos parâmetros de usinagem

Os parâmetros de usinagem selecionados para os ensaios foram o avanço de corte e a velocidade de corte da ferramenta. Como os testes contemplavam brocas com revestimento e sem revestimento, a definição dos parâmetros se torna importante para garantir a melhor condição de usinagem e a de maior influência devido a diferenças nos materiais dos substratos. Os parâmetros foram definidos a partir do Machining Data Handbook e também com a experiência de testes de furação anteriores da fabricante da ferramenta.

Foram realizados 3 testes para cada condição, totalizando 48 peças ensaiadas. Os valores selecionados para os parâmetros de teste podem ser visualizados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e estão descritos na sequência:

- a) Velocidade de corte, entre 20m/min e 30m/min;
- b) Avanço de corte, entre 0,075mm/rot a 0,110 mm/rot;
- c) Material das ferramentas, Z2 e AISI M2;
- d) Com revestimento de TiN e sem revestimento de TiN.

As variáveis de resposta bem como os critérios que foram observados neste ensaio são os seguintes:

- a) Desgaste máximo com $VB_{\text{médio}}=0,2\text{mm}$;
- b) Qualidade do furo, de acordo com a rugosidade superficial Ra;
- c) Qualidade de furação, de acordo com o a medição do diâmetro dos furos realizados.

As 16 condições de teste com os parâmetros utilizados podem ser observados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 4.2 Planejamento para a execução das amostras.

Variável de entrada	Nível (-1)	Nível (+1)
Velocidade de corte (Vc) - m/min	20	30
Avanço (f) - mm/volta	0,075	0,110
Revestimento	Com revestimento	Sem revestimento
Material da ferramenta	Z2	AISI M2

Tabela 4.3 Parâmetros utilizados na execução dos ensaios de furação.

Ensaio	Avanço (mm/volta)	Velocidade de corte (m/min)	Revestimento	Material da ferramenta
1	0,075	20	Com	Z2
2	0,11	20	Com	Z2
3	0,075	30	Com	Z2
4	0,11	30	Com	Z2
5	0,075	20	Sem	Z2
6	0,11	20	Sem	Z2
7	0,075	30	Sem	Z2
8	0,11	30	Sem	Z2
9	0,075	20	Com	AISI M2
10	0,11	20	Com	AISI M2
11	0,075	30	Com	AISI M2
12	0,11	30	Com	AISI M2
13	0,075	20	Sem	AISI M2
14	0,11	20	Sem	AISI M2
15	0,075	30	Sem	AISI M2
16	0,11	30	Sem	AISI M2

4.10 Parâmetros de tratamento térmico das ferramentas

O tratamento térmico do aço Z2 necessitou de um pré-teste para a verificação dos melhores valores de tempo e temperatura para a obtenção das propriedades mecânicas e metalúrgicas necessárias para a fabricação das brocas.

O pré-teste foi realizado com os parâmetros informados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, sendo que foram obtidos junto ao fornecedor pelas experiências anteriores de tratamento térmicos com este material.

Tabela 4.4 Parâmetros de tratamento térmico utilizados para o pré-teste de tratamento térmico do aço Z2.

Parâmetros	Condição 1		Condição 2		Condição 3	
	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)
Pré - Aquecimento 1	550	3600	550	3600	550	3600
Pré - Aquecimento 2	880	94	880	94	880	94
Austenitização	1115	94	1165	94	1215	94
Resfriamento	545	300	545	300	545	300

Nos fornos de banho de sal, foram utilizados os sais informados na Tabela 4.5, em função da temperatura de processo requerida. Os fornos utilizados são apresentados na Figura 4.14-a e os fornos de revenimento são mostrados Figura 4.14-b, todos localizados na empresa.

Tabela 4.5 Sais utilizados no tratamento térmico.

	Marca	Temperatura de trabalho usual (°C)	Faixa de trabalho (°C)	Tipo de banho
Cloreto de Bário + cloreto de sódio	TEC CNV	1220	1050 a 1300	Aquecimento
Cloreto de Bário + cloreto de sódio+ Cloreto de potássio	TEC 540	845	600 a 900	Pré aquecimento
Cloreto de Bário + cloreto de sódio+ Cloreto de potássio	TEC 430	540	480 a 800	Resfriamento



(a)



(b)

Figura 4.14 a) Visão geral dos fornos de banho de sal utilizados nos tratamentos térmicos. b) Visão geral dos fornos de revenimento utilizados nos tratamentos térmicos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados dos ensaios realizados para a caracterização da qualidade das ferramentas utilizadas nos ensaios e a sua relação com os parâmetros de usinagem determinados. Os materiais foram caracterizados pela sua composição química, microestrutura e propriedades mecânicas e as ferramentas foram avaliadas dimensionalmente, com o objetivo de minimizar a influência sobre o desempenho da ferramenta e a verificação da adesão do revestimento sobre o substrato.

Os ensaios de furação foram realizados com o objetivo de observar a interação do material do substrato com o revestimento, de acordo com fatores estabelecidos, foram verificados pela análise de desgaste, da rugosidade dos furos ao longo do comprimento usinado e do diâmetro da furação.

5.1 Composição química dos aços utilizados

A análise de composição química foi realizada na empresa LABMAT e os resultados são mostrados na Tabela 5.1. Pode ser observado um menor percentual de tungstênio, molibdênio e vanádio no aço Z2 quando comparado ao AISI M2.

Tabela 5.1 Composição química das amostras de Z2 e AISI M2.

Material	Elementos químicos (%) - Percentual encontrado, em massa								
	C	W	Mo	Cr	V	Mn	Si	P	S
AISI M2	0,88	6,09	4,80	3,96	1,76	0,25	0,420	0,024	0,001
Z2	0,92	2,97	3,35	4,38	1,41	0,29	0,404	0,026	0,005

5.2 Definição do Tratamento térmico das amostras em aço Z2

Os resultados do pré-teste em relação aos valores de dureza obtidos podem ser verificados na Tabela 5.2. As medições foram realizadas em microdurômetro Vickers nas

condições temperado e revenido e em Brinell para a condição como recebido e convertido para Rockwell C para realização da análise comparativa.

Tabela 5.2 Ensaio de dureza realizados no pré-teste.

	Como recebido	Média	Temperado	Média	Revenido	Média
			61,4		62	
Condição 1 (HRc)	22,8		60	60,8	59,1	61,1
			61,1		62,2	
			61,5		63,8	
Condição 2 (HRc)	23,4	23,2	62,8	62,0	63,3	63,7
			61,8		64	
			62,4		63,8	
Condição 3 (HRc)	23,3		63,3	63,2	63,3	63,7
			63,9		64	

A análise da microestrutura do material Z2 como recebido foi realizada conforme a norma DIN SEP 1615 para a verificação da distribuição de carbonetos primários. Pode ser visualizada na Figura 5.1 o material em corte transversal e na Figura 5.2 em corte longitudinal, sendo que foram classificados em 1A que de fato é uma distribuição admissível para o material com diâmetro 1/4”.

Os parâmetros de tratamento térmico, em relação a temperatura de austenitização, foram estabelecidos a partir de testes práticos realizados na faixa de 1100°C até 1250°C, com barras de diâmetro 1/4”, com a avaliação do ganho de dureza superficial chegando o mais próximo possível da esperada para o aço rápido temperado, em torno de 62 HRC. A partir destas temperaturas, foram estabelecidas as condições para o pré-teste, entre 1115°C e 1215°C, complementado pela averiguação de tamanho de grão, pelo método Snyder-Graff ou ASTM E-112, avaliação de possível empobrecimento de borda, presença de austenita retida e do ganho de dureza ao longo da seção transversal.

Pode ser observada a microestrutura na condição temperada com temperatura de austenitização de 1115°C na Figura 5.3, ficando com tamanho de grão 18. Na Figura 5.4 pode ser observada a microestrutura do material temperado com temperatura de austenitização de 1165°C, com tamanho de grão 12, considerado fino. Na Figura 5.5 a microestrutura do material temperado com temperatura de austenitização de 1215°C, ficando com tamanho de grão 8, considerado grosseiro.



Figura 5.1 Corte transversal do aço Z2 na condição recozido. Aumento de 100x. Ataque Nital 10%. Tempo de ataque 60s.

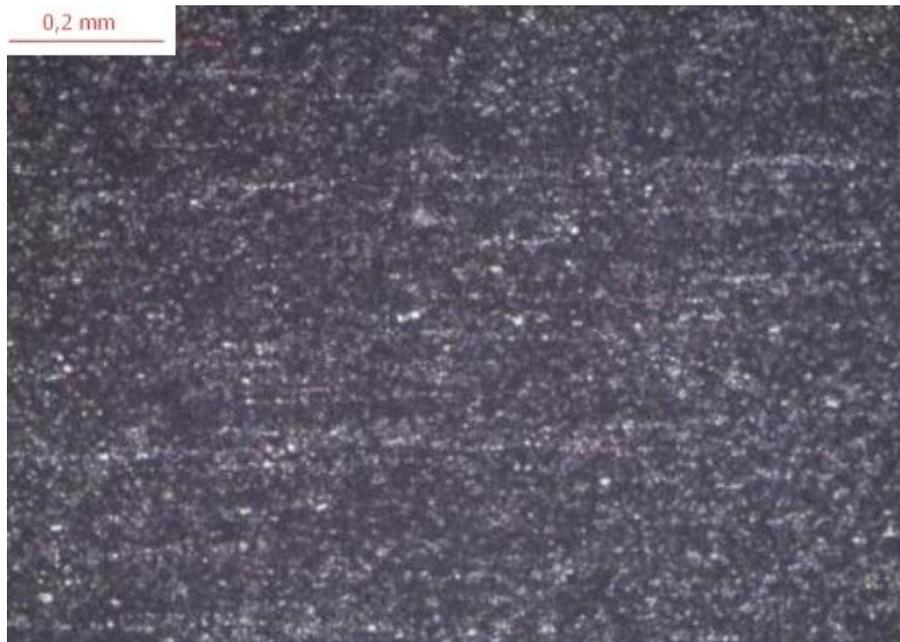


Figura 5.2 Corte longitudinal do aço Z2 na condição de recozido. Aumento de 100x. Ataque Nital 10%. Tempo de ataque 60s.

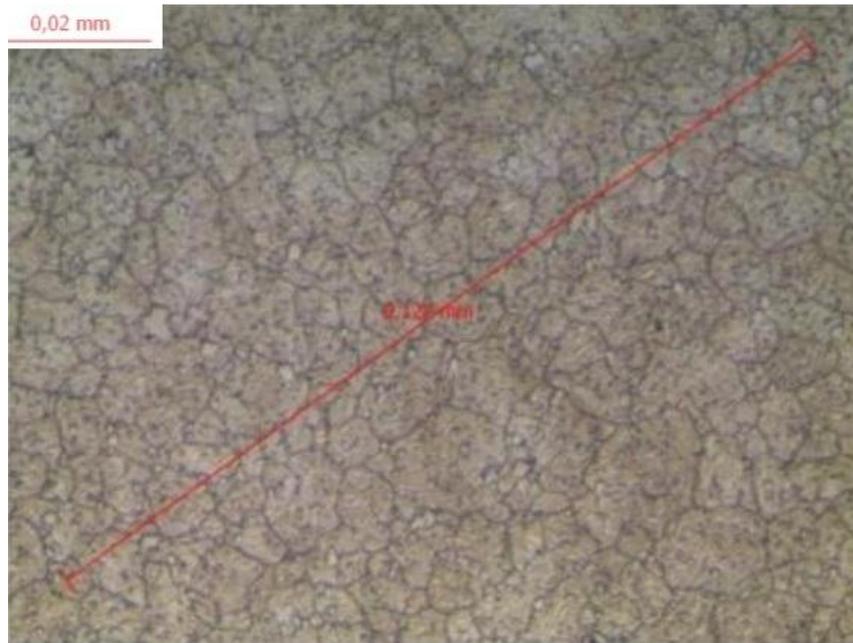


Figura 5.3 Material Z2 temperado nas condições de tratamento térmico 1. Aumento 1000x. Ataque de Nital 4%.



Figura 5.4 Material Z2 temperado nas condições de tratamento térmico 2. Aumento 1000x. Ataque Nital 4%.

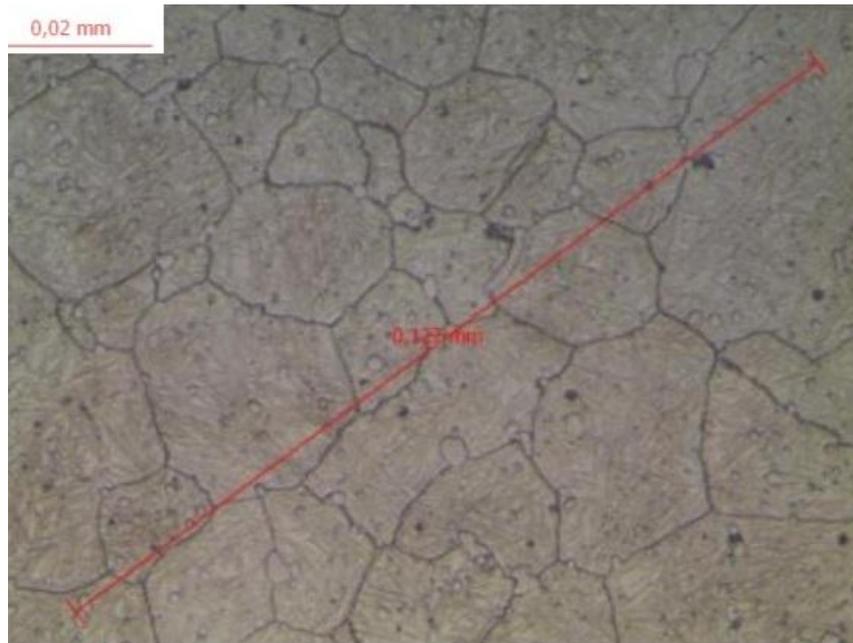


Figura 5.5 Material Z2 temperado na condição de tratamento térmico 3. Aumento 100ox. Ataque Nital 4%.

A microestrutura do material Z2 com têmpera e revenimento pode ser observada nas Figura 5.6, com austenitização de 1115°C. A Figura 5.7 com temperatura de austenitização de 1165°C. Na Figura 5.8 com temperatura de austenitização de 1215°C. Nesta etapa foi identificado o nível de transformação da austenita em martensita, o nível de austenita retida e o coalescimento de carbonetos presentes.

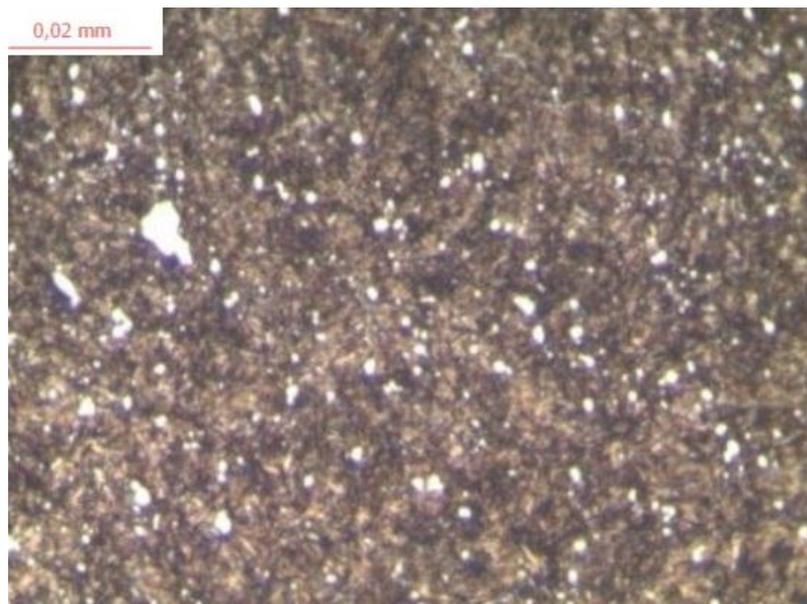


Figura 5.6 Material Z2 temperado e revenido três vezes nas condição de tratamento térmico 1. Aumento 1000x. Ataque Nital 4%.

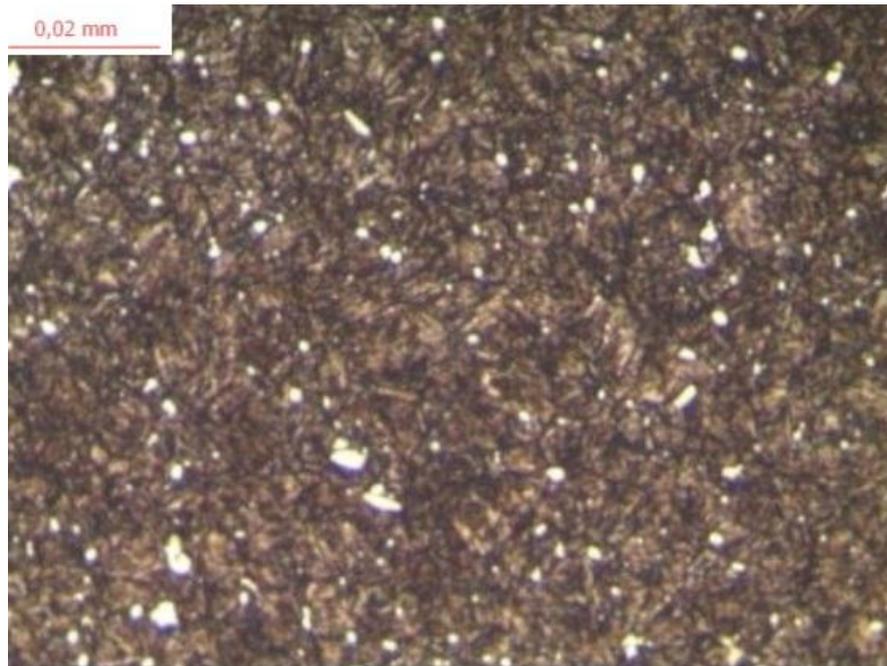


Figura 5.7 Material Z2 temperado e revenido três vezes na condição de tratamento térmico 2. Aumento 1000x. Ataque Nital 4%.

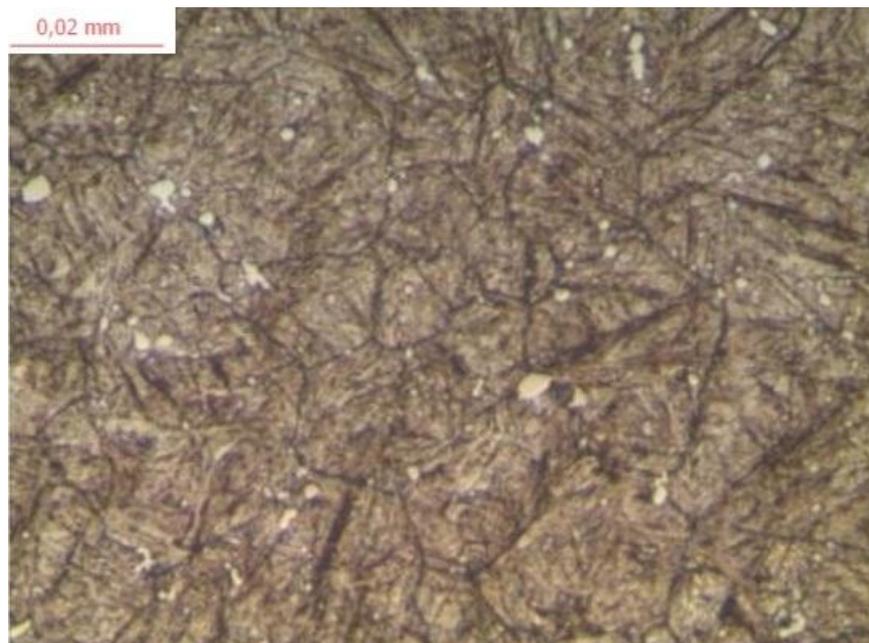


Figura 5.8 Material Z2 temperado e revenido três vezes na condição de tratamento térmico 3. Aumento 1000x. Ataque Nital 4%.

De acordo com as microestruturas analisadas e os valores de dureza obtidos, foram adotados os parâmetros de tratamento térmico da condição 2, isto é, austenitização de 1165°C e triplo revenimento a 560°C.

5.3 Tratamento térmico das amostras em aço Z2

Após a definição dos parâmetros de tratamento térmico indicados para o aço Z2, foi realizado o tratamento térmico final dos pinos com diâmetro Ø1/4". Na Tabela 5.3 estão os valores de dureza encontrados para os pinos em Z2.

Tabela 5.3 Valores de dureza em HRC dos pinos para testes de furação.

	Como recebido (HRc)	Média	Temperado (HRc)	Média	Revenido (HRc)	Média
	25,5		61,5		63,8	
	26,5		62,8		63,3	
Diam. 1/4"	26,1	26,3	61,5	61,9	64,1	63,6
	27,0		62,1		63	
	26,6		61,8		64	

5.4 Tratamento térmico das amostras em aço AISI M2

Os parâmetros utilizados para o tratamento térmico do aço AISI M2 estão indicados na Tabela 5.4. Os valores foram determinados pela experiência com utilização do material bem como com a indicação pelo seu diagrama TTT.

Tabela 5.4 Condições de tratamento térmico utilizado para o aço AISI M2.

Condições	Faixas	Temperatura (°C)[Tempo (s)
	Pré - Aquecimento 1	550	3600
	Pré - Aquecimento 2	880	94
AISI M2	Austenitização	1220	94
	Resfriamento	545	300
	Revenimento (3 ciclos)	560	2 horas

Segue a microestrutura do material AISI M2, como recebido, onde foi analisado a distribuição dos carbonetos primários na microestrutura pela Figura 5.9, com corte transversal e na Figura 5.10, com corte longitudinal. Pela classificação da norma DIN SEP 1615, este material foi definido com uma distribuição aceitável para a realização dos tratamentos térmicos.



Figura 5.9 Material AISI M2 como recebido em corte transversal. Aumento 100x. Ataque Nital 10%. Tempo de ataque 60s.

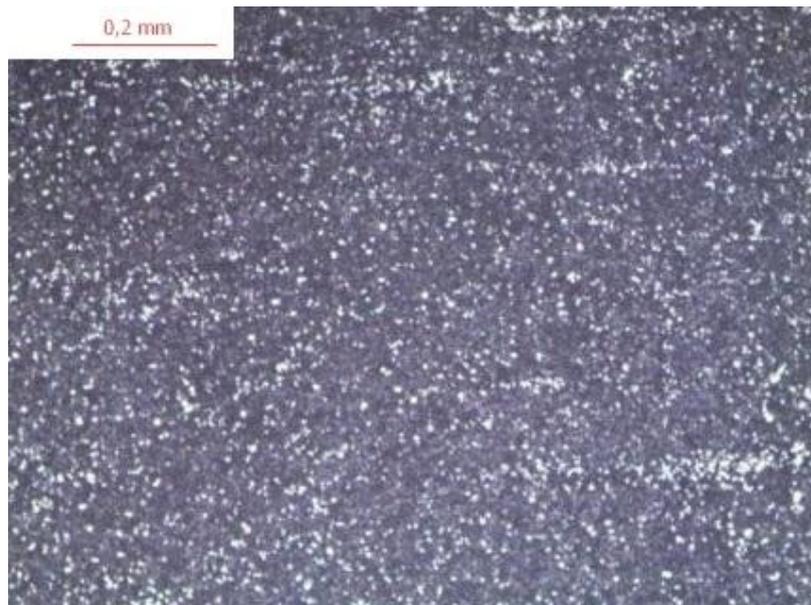


Figura 5.10 Material AISI M2 como recebido em corte longitudinal. Aumento 100x. Ataque Nital 10%. Tempo de ataque 60s.

As figuras que seguem apresentam a microestrutura das amostras temperadas e revenidas do aço AISI M2. A Figura 5.11 mostra o material como temperado a partir de uma austenitização a 1220°C. Pelo método Snyder-Graff ou ASTM E-112, o tamanho de grão obtido foi 14, sendo considerado fino.

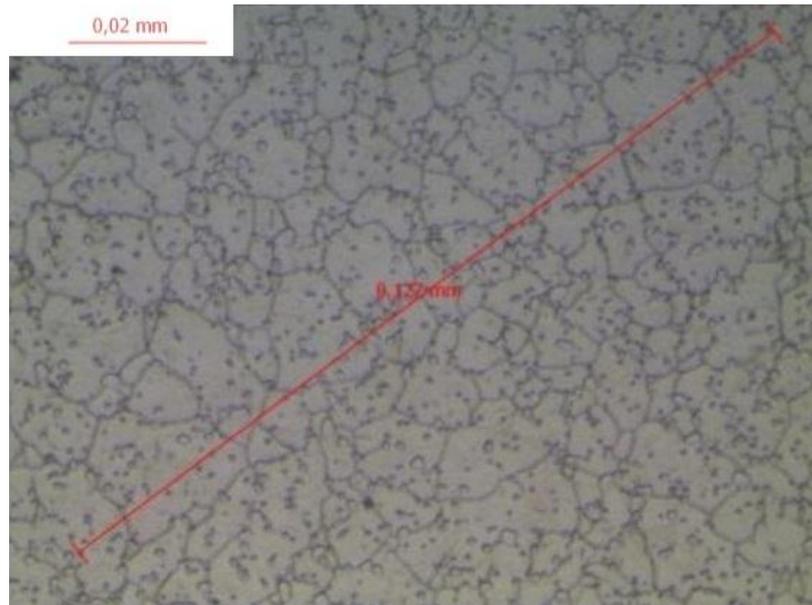


Figura 5.11 Tamanho de grão de aço AISI M2 temperado. Aumento 1000x. Ataque Nital 4%. Tempo de ataque 60s.

Na Figura 5.12, pode ser observada a microestrutura do material revenido três vezes a 560°C.

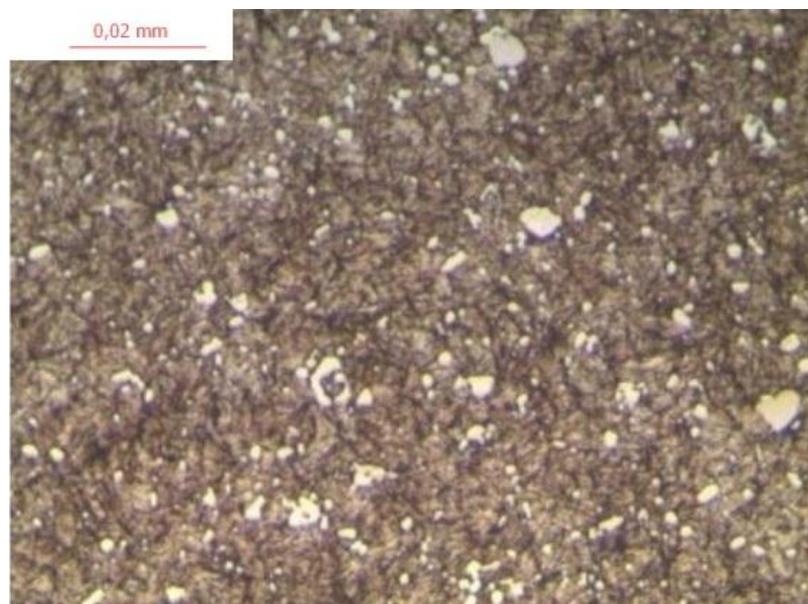


Figura 5.12 Microestrutura do AISI M2 temperado e revenido. Aumento 1000x. Ataque Nital 4%. Tempo de ataque 7s.

Os valores de dureza obtidos para o aço AISI M2 podem ser observados na Tabela 5.5. Para a condição de como recebido, o método de dureza empregado foi o Brinell, enquanto que para as amostras com tratamento térmico foi o Vickers, sendo posteriormente convertido para

Rockwell escala C. Percebe-se que a dureza obtida para a condição revenida dentro da faixa de especificação sugerida na DIN 1414-1 para este tipo de ferramenta.

Tabela 5.5 Valores de dureza obtidos para os pinos em aço AISI M2.

	Como recebido	Média	Temperado	Média	Revenido	Média
Diâmetro 1/4"	27,4		66		64,3	
	27,3		66,3		64,3	
	29,0	27,9	66,3	66,0	64,4	64,0
	27,7		65,5		63,7	
	28,2		65,9		63,4	

5.5 Verificação dimensional

A verificação das dimensões das brocas usinadas indicou uma baixa variação dimensional, deixando todas as brocas em conformidade com as especificações constantes na norma DIN 1414-1 e DIN 338. O método de verificação dimensional seguiu a recomendação da norma DIN 1414-2. A baixa variação dimensional verificada nas peças, oriundo do processo de usinagem das ferramentas, contribuiu para diminuir a variação dos resultados observados nos ensaios de furação.

5.6 Verificação da qualidade da fabricação

Para a avaliação da qualidade de fabricação das brocas, foram realizadas verificações metalográficas da aresta transversal e avaliação visual no final do canal das ferramentas, logo após o processo de retifica. Para tal, foram observadas 5 brocas em cada etapa, no início, na metade e no final da fabricação do lote de peças, e não foram encontradas falhas decorrentes do processo, como queimas de retifica, que poderiam comprometer os ensaios de furação.

5.7 Ensaios de furação

Os ensaios de furação foram realizados com o objetivo de verificar o desgaste das amostras, o número de furos, a rugosidade e o diâmetro dos furos. Na sequência, são observados os ensaios de desgaste, após, serão avaliados os ensaios de rugosidade e posteriormente, os ensaios de avaliação de diâmetro de furação.

5.7.1 Desgaste da ferramenta

As avaliações do desgaste de flanco para as condições de teste 1, 5, 9 e 13 podem ser observados na Figura 5.13, em função do comprimento usinado. O avanço de corte utilizado foi de $f_n=0,075\text{mm/rot}$ e a velocidade de corte de $V_c=20\text{m/min}$.

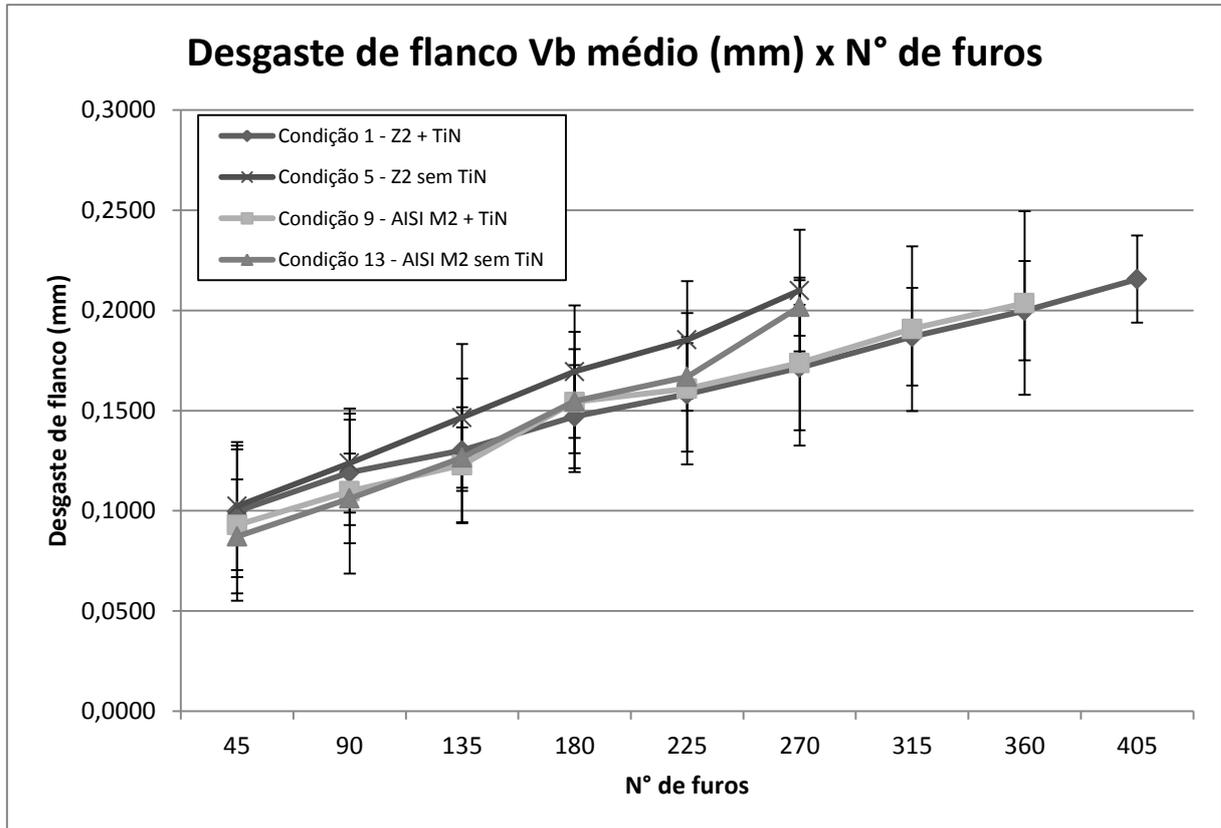


Figura 5.13 Desgaste de flanco $V_{b\text{médio}}$ para as condições com $V_c=20\text{m/min}$ e $f_n=0,075\text{mm/rot}$.

Nestas condições, foram observadas diferenças para o desgaste das ferramentas, sendo que nas condições onde a variável significativa foi o material do substrato, na condição 1 (Z2 com TiN) e na condição 9 (AISI M2 com TiN), os desgastes não apresentaram diferenças significativas.

No entanto, quando comparada a condição 5 (Z2 sem TiN) e a condição 13 (AISI M2 sem TiN) foi possível observar uma progressão do desgaste, evidentemente superior para a condição 5, sendo que o $V_{b\text{médio}}$ foi atingido 32% antes que na condição 13.

Quando foram comparadas as condições 1 (Z2 com TiN) e 5 (Z2 sem TiN) foi observado um desgaste reduzido para as brocas com TiN, como era esperado. Mesma

tendência ocorreu quando foram comparadas as condições 9 (M2 com TiN) e 13 (M2 sem TiN), sendo observado um menor desgaste nas brocas com revestimento.

Na Figura 5.14 podem ser observados os furos realizados para as condições de corte 1, 5, 9 e 13 com o número de furos realizados para o desgaste de flanco $V_{b\text{médio}}=0,2\text{mm}$.

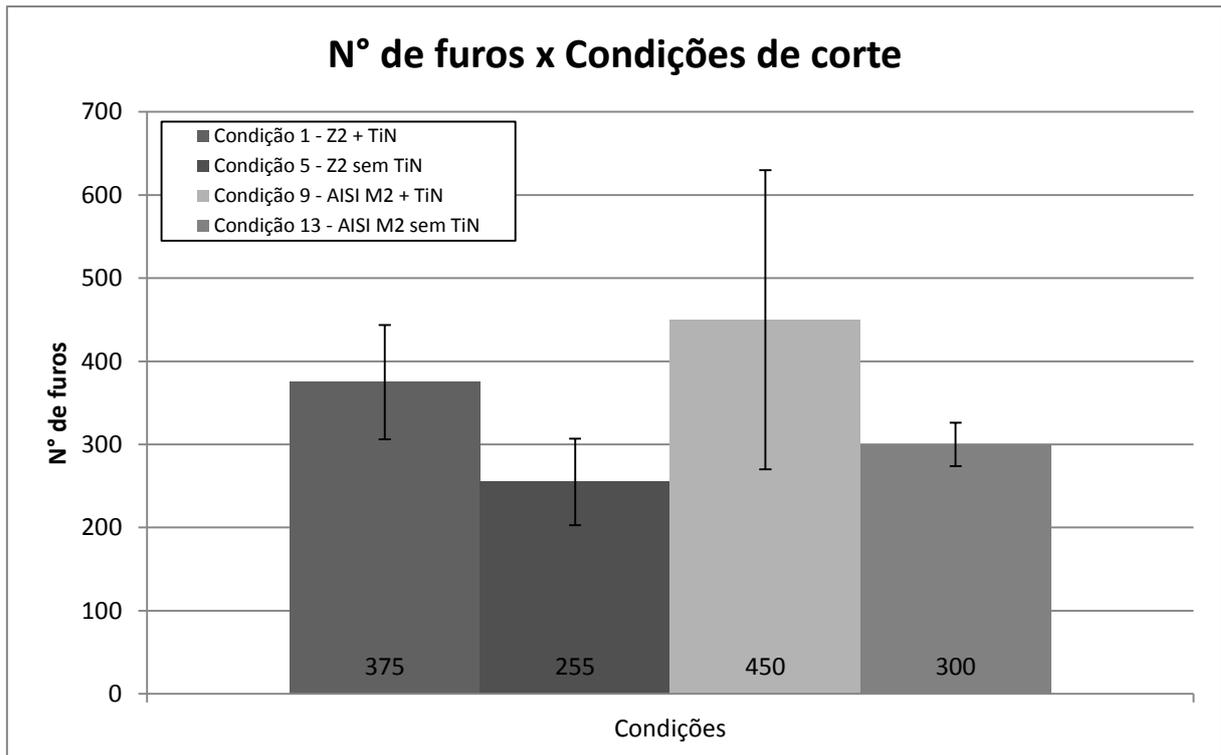


Figura 5.14 Número de furos realizados com $V_{b\text{médio}}=0,2\text{mm}$ e $V_c=20\text{m/min}$ e $f_n=0,075\text{mm/rot.}$

A quantidade de furos realizados pela condição 9 (AISI M2 com TiN) foi 50% superior em relação a condição 13 (AISI M2 sem TiN), como era esperado para estas condições. Porém, com um erro maior associado ao teste.

A condição 1 (Z2 com TiN) obteve um número de furos 47% superior em relação a condição 5 (Z2 sem TiN). Neste comparativo a diferença entre as amostras foi na utilização do revestimento da ferramenta. Como esperado, a quantidade de furos das brocas com revestimento foi superior em relação às brocas sem revestimento, devido ao aumento da vida útil da ferramenta comumente observada para as peças com revestimento.

Na Figura 5.15 pode ser observado o desgaste em função do número de furos realizados para as condições 2, 6, 10 e 14 com os parâmetros de corte de avanço de corte de $f_n=0,110$ mm/rot e a velocidade de corte de $V_c=20$ m/min.

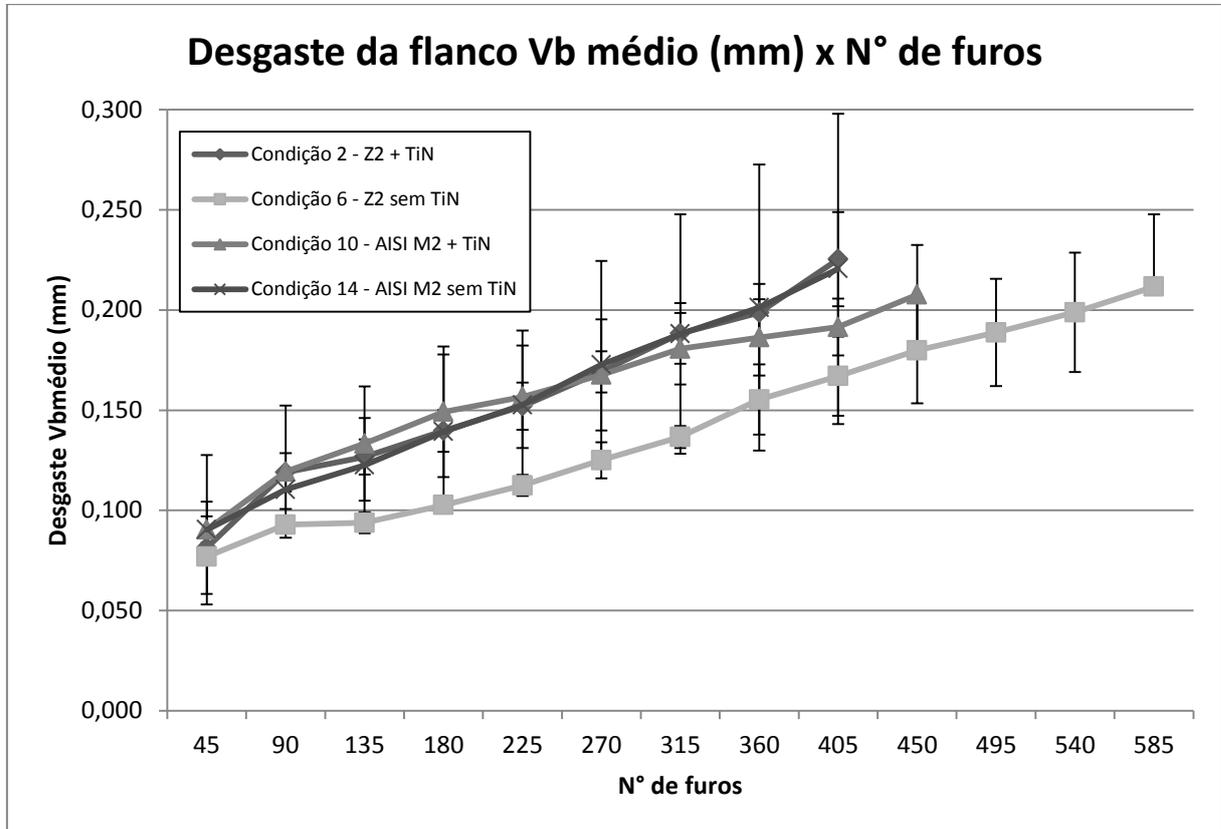


Figura 5.15 Desgaste de flanco $V_{b\text{méd}}io$ para as condições com $V_c=20$ m/min e $f_n=0,110$ mm/rot.

Entre as condições 2 (Z2 com TiN) e 6 (Z2 sem TiN), pode ser notada uma diferença significativa para o desgaste das ferramentas, mesmo que ambas possuem o mesmo substrato. Foi observada uma redução no desgaste da ferramenta de 45,8% para a condição 6, sem TiN, em relação à condição 2, com TiN.

Para as condições 10 (AISI M2 com TiN) e 14 (AISI M2 sem TiN), onde a diferença entre as ferramentas de corte foi apenas a presença do revestimento, não foi possível identificar uma diferença significativa para o desgaste de flanco das brocas.

Estas diferenças em relação ao desgaste entre as peças com e sem revestimento podem estar relacionadas com as velocidades de corte utilizadas, geradores do gume postiço sobre a ferramenta, proporcionando a ocorrência de microlascamentos na aresta de corte das brocas com revestimento, aumentando a progressão do desgaste nestas condições.

No comparativo entre a condição 2 (Z2 com TiN) e a condição 10 (AISI M2 com TiN) o desgaste para a condição 2 foi mais agressivo, pois ao atingir 450 furos foi observado um desgaste 20% superior em relação à condição 10.

Na análise realizada pelo comparativo entre a condição 6 (Z2) e a condição 14 (AISI M2), ambas sem revestimento, o maior desgaste ocorreu para a condição 14, sendo que ao atingir 450 furos o desgaste foi 31,6% superior em relação à condição 6.

Na Figura 5.16 pode ser observado o número de furos realizados para as condições 2, 6, 10 e 14, para o desgaste de flanco $V_{b_{médio}} = 0,2\text{mm}$.

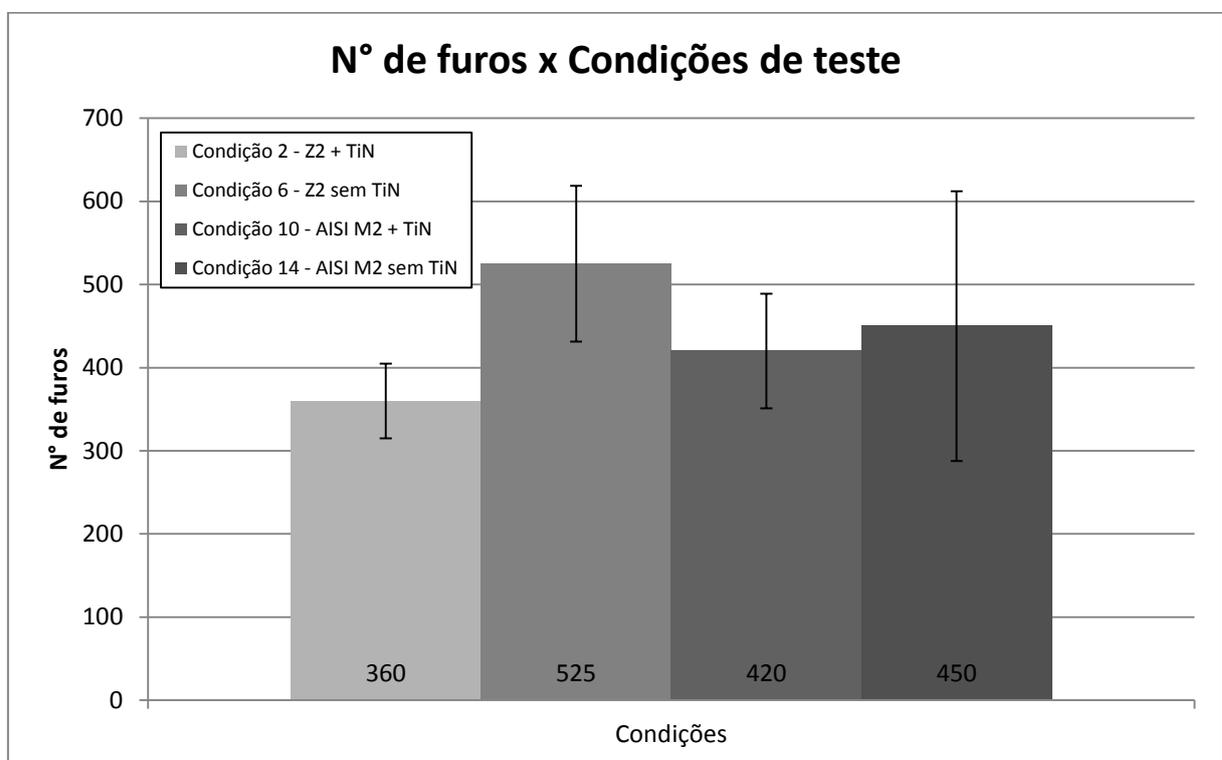


Figura 5.16 Número de furos realizados com $V_{b_{médio}}=0,2\text{mm}$ e $V_c=20\text{m/min}$ e $f_n=0,110\text{mm/rot}$.

Foi observado um maior número de furos realizados para a condição 6 (Z2 sem TiN), sendo 32% superior à condição 2 (Z2 com TiN). Porém, com um erro maior associado ao teste, com variação de 15%.

A condição 14 (AISI M2 sem TiN), em relação a condição 10 (AISI M2 com TiN) também se mostra superior em 7%, porém com erro associado de 15%. Neste caso, esta diferença não foi considerada como significativa.

Estas diferenças podem estar relacionadas com o aumento do avanço de corte, o que melhora o escoamento do cavaco sobre a superfície da ferramenta e aumenta a força de corte aplicada sobre o material. A adesão do material usinado sobre a ferramenta de corte, comum nesta faixa de utilização dos parâmetros, pode justificar esta proximidade entre as condições com e sem revestimento de corte, o que acentua a fratura dos filmes finos, reduzindo o seu desempenho.

Na Figura 5.17 são observadas as condições 3, 7, 11 e 15 com a modificação dos parâmetros de velocidade de corte para $V_c = 30\text{m/min}$, assim como também o avanço de corte sendo diminuído para $f_n = 0,075\text{mm/rot}$.

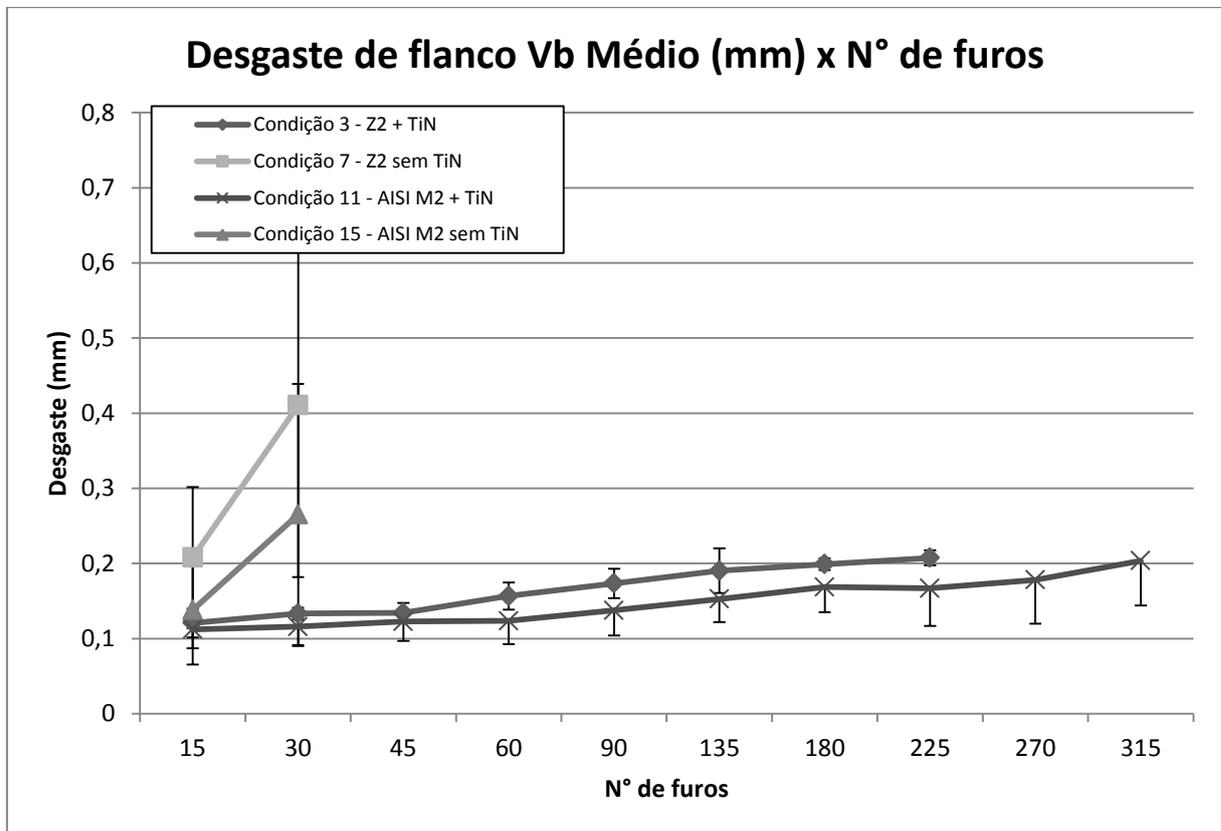


Figura 5.17 Desgaste de flanco $V_{b\text{médio}}$ para as condições com $V_c = 30\text{m/min}$ e $f_n = 0,075\text{mm/rot}$.

Para as condições 7 (Z2) e 15 (AISI M2), onde diferem apenas pelo substrato e ambas as condições sem revestimento, foi observada uma diferença significativa em relação ao desgaste abrasivo das ferramentas. A condição 7, apesar do reduzido número de furos, obteve um desgaste 54,7% superior em relação à condição 15.

O comparativo entre as condições 3 (Z2 com TiN) e 7 (Z2 sem TiN), ambas com o material Z2, com a presença do revestimento, proporcionaram um desgaste 308% inferior ao atingir o furo 30 para as peças com TiN.

No comparativo entre as condições 11 (AISI M2 com TiN) e 15 (AISI M2 sem TiN), a redução do valor de desgaste da condição 11 em relação à condição 15 foi de 99%. Esta superioridade era esperada em função do revestimento de TiN sobre o substrato da ferramenta.

Na Figura 5.18 são observados os furos realizados para as condições de corte 3, 7, 11 e 15, considerando o desgaste de flanco $V_{b\text{méd}}=0,2\text{mm}$, com velocidade de corte $V_c=30\text{m/min}$ e avanço de corte de $f_n=0,075\text{mm/rot.}$

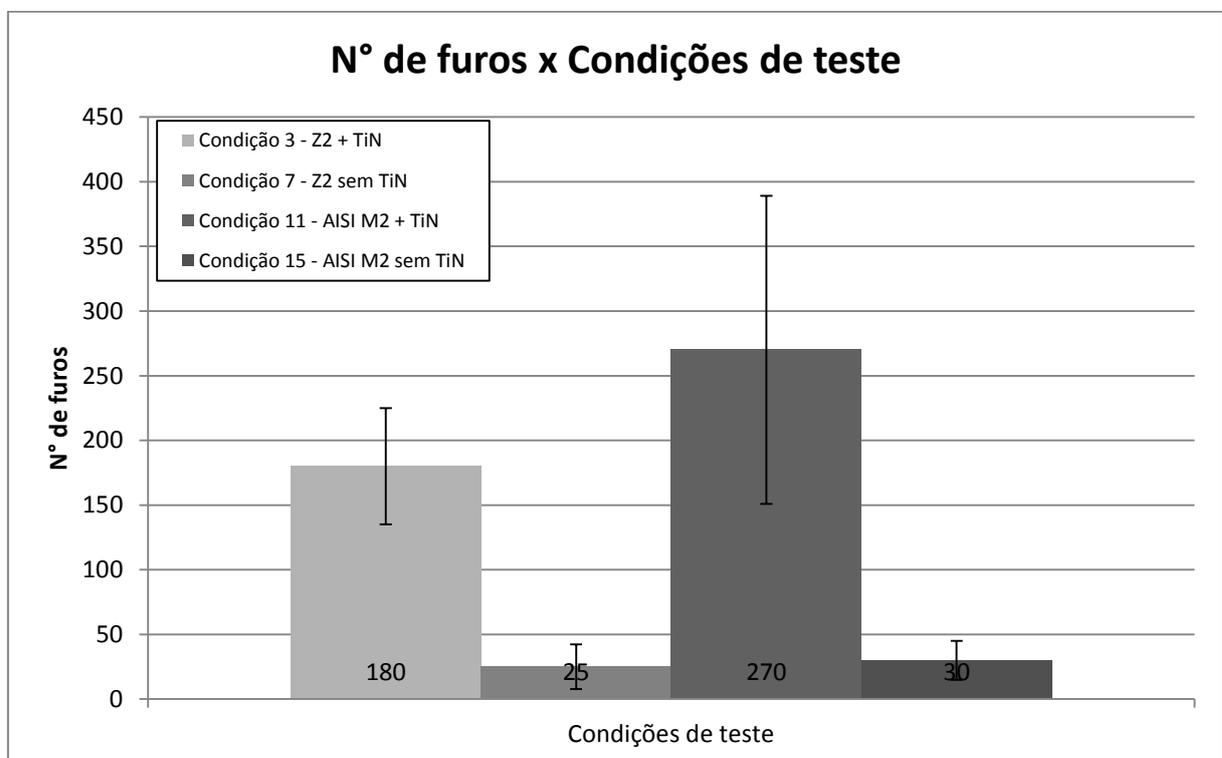


Figura 5.18 Número de furos realizados com $V_{b\text{méd}}=0,2\text{mm}$ e $V_c=30\text{m/min}$ e $f_n=0,075\text{mm/rot.}$

Foi observado uma quantidade de furos realizados para a condição 3 (Z2 com TiN) superior à condição 7 (Z2 sem TiN). Porém, nestes testes, ocorreram falhas catastróficas das brocas ensaiadas. Mesmo problema ocorreu na comparação das condições 11 (AISI M2 com TiN) e 15 (AISI M2 sem TiN).

No comparativo entre as condições 3 (Z2) e 11 (AISI M2), ambas com TiN, foi possível observar um desgaste para a condição 3 superior em 24,3 % em relação à condição 11.

Estas diferenças em relação ao desgaste da ferramenta e ao número de furos realizados pode ser atribuído a menor quantidade de carbonetos resistentes a alta temperatura associados ao material Z2 quando comparado com o AISI M2, o que proporciona melhores propriedades de resistência a quente para estes materiais.

Para a Figura 5.19 foram relacionados os desgastes obtidos para as ferramentas de corte nas condições 4, 8, 12 e 16 com a velocidade de corte $V_c = 30\text{m/min}$ e avanço de corte $f_n = 0,110\text{mm/rot.}$

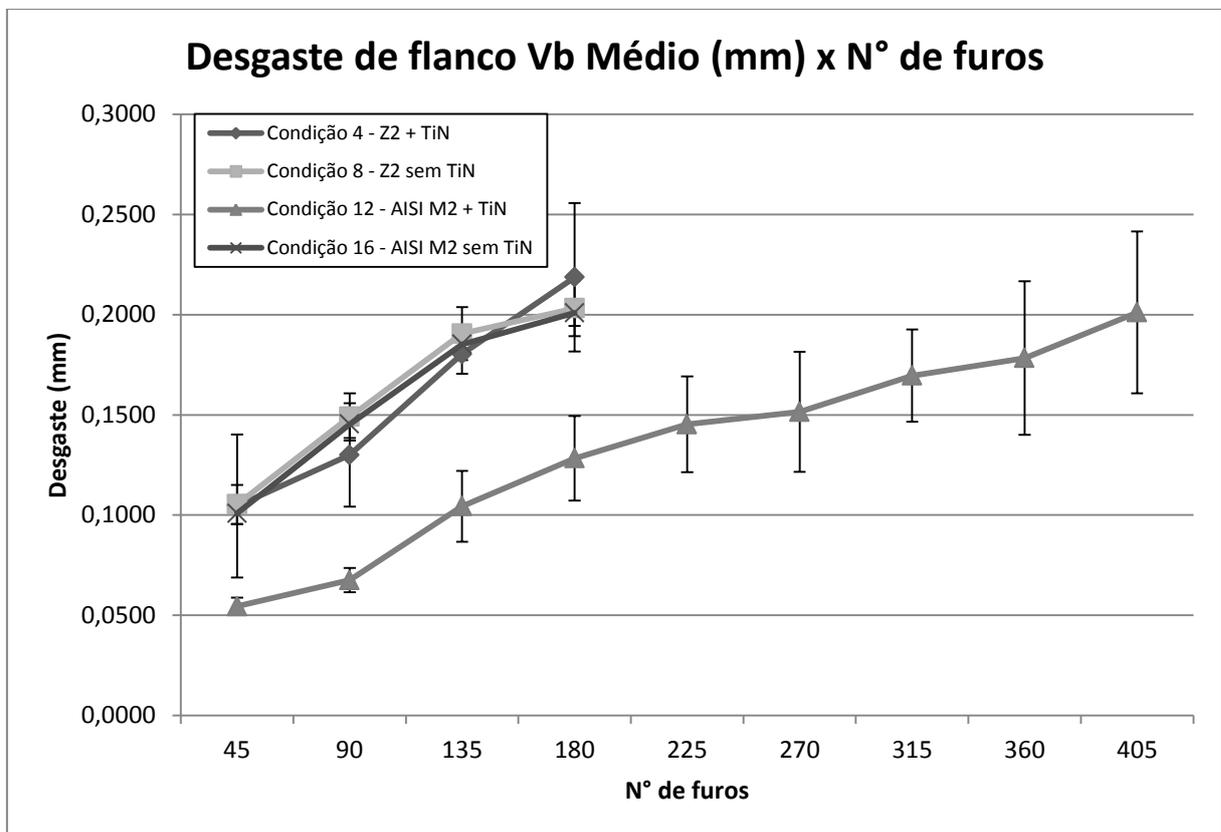


Figura 5.19 Desgaste de flanco $V_{b\text{méd}}io$ para as condições com $V_c = 30\text{m/min}$ e $f_n = 0,110\text{mm/rot.}$

Nesta análise, para as condições 4 (Z2 com TiN) e 8 (Z2 sem TiN) não foram identificadas diferenças significativas em termos de desgaste da ferramenta.

Esta proximidade dos valores de desgaste obtido pode estar relacionada com o desgaste abrasivo sofrido pelo material, sendo observado um melhor desempenho, mesmo

sem o revestimento da ferramenta, devido ao aumento da força de corte, causando um microlascamento e consequente aumento do desgaste nas peças com o revestimento.

Quando foram comparadas as condições 4 (Z2) e 12 (AISI M2), ambas com revestimento, foi notado um desgaste 70,4% superior para a condição 4 em relação à condição 12 para o furo 180.

Já para a condição 8 (Z2) em relação a condição 16 (AISI M2) o desgaste foi 1,1% superior, não sendo significativa a diferença.

Para as condições 12 (AISI M2 com TiN) e 16 (M2 sem TiN) a diferença nas amostras era apenas em relação a presença do revestimento. Para isto, a condição 12 obteve uma média de desgaste 300% inferior em relação à condição 16, apesar do erro atribuído a esta condição ser superior.

Na Figura 5.20 são observados os furos realizados para as condições de corte 4, 8, 12 e 16, considerando o desgaste de flanco $V_{b\text{méd}}=0,2\text{mm}$, com velocidade de corte de $V_c=30\text{m/min}$ e avanço de corte de $f_n=0,110\text{mm/rot}$.

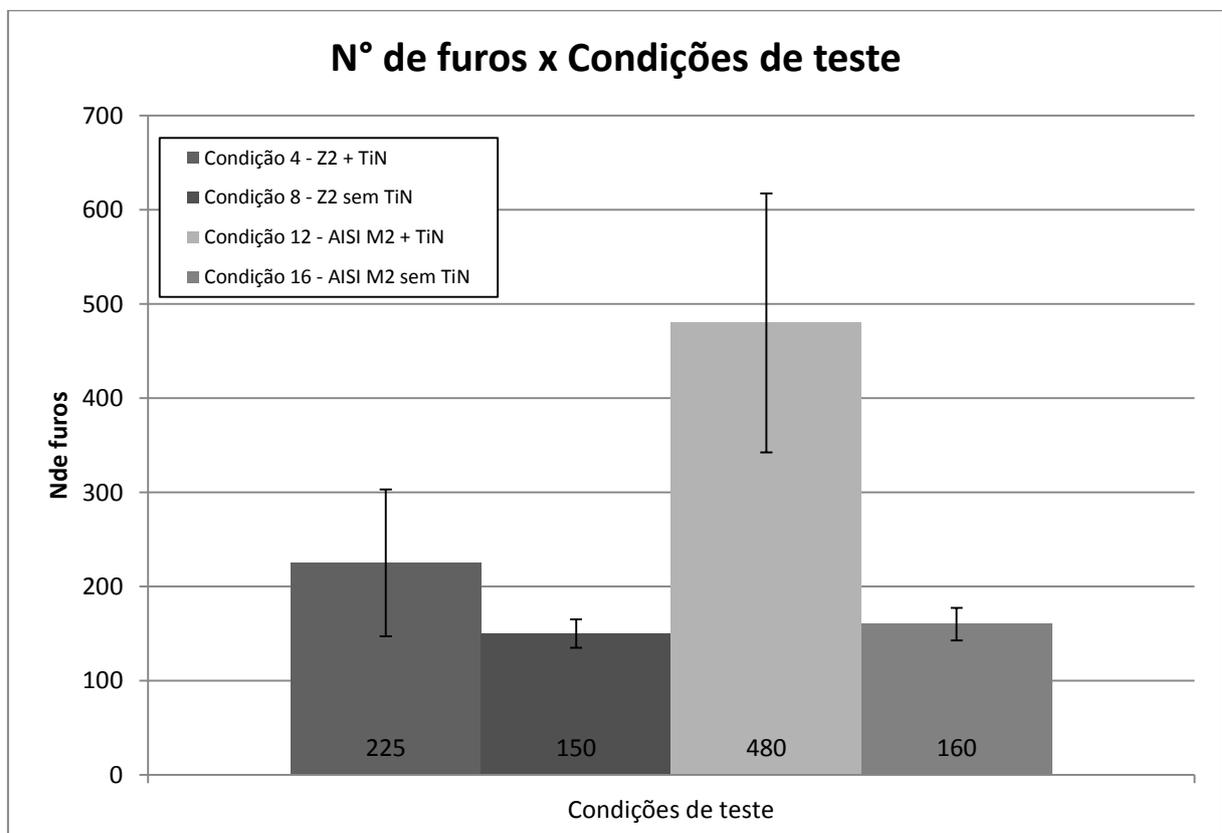


Figura 5.20 Número de furos realizados com $V_{b\text{méd}}=0,2\text{mm}$ e $V_c=30\text{m/min}$ e $f_n=0,110\text{mm/rot}$.

Foi constatado uma quantidade de furos realizados para a condição 4 (Z2 com TiN), 50% superior à condição 8 (Z2 sem TiN). Porém, esta condição possui um erro associado de 34,6%, não tornando significativa a diferença devido a faixa de variação do comparativo.

Para a condição 12 (AISI M2 com TiN) em relação à condição 16 (AISI M2 sem TiN) o aumento foi maior, cerca de 300%. Esta diferença foi significativa em função do baixo número de furos relacionados com a condição 16.

Na comparação da quantidade de furos realizados pela condição 4 (Z2 com TiN) em relação a condição 12 (AISI M2 com TiN), foi verificado para a condição 12 uma superioridade de 213% sobre a condição 4. Quando foram comparadas as condições 8 (Z2 sem TiN) e 16 (AISI M2 sem TiN) não foram observadas diferenças significativas, em função do erro associado com o ensaio.

Sem a presença do revestimento, o Z2 apresenta um desgaste abrasivo significativo nesta condição de corte, devido ao aumento dos parâmetros de corte e ao consequente aumento da temperatura de furação. A menor resistência a alta temperatura devido ao menor volume de carbonetos primários gerado pelo menor volume de elementos de liga em sua microestrutura pode ter ocasionado esta maior exposição e o consequente aumento do desgaste.

5.7.2 Qualidade dos furos – Rugosidade superficial

Os valores de rugosidade para cada condição foram verificados com 25,4mm, 2286mm, 4572mm e 6858mm de comprimento de furação. Os valores obtidos podem ser observados nas figuras que seguem.

Na Figura 5.21 podem ser observados os valores de rugosidade para as brocas nas condições 1, 5, 9 e 13. A velocidade de corte de $V_c=20\text{m/min}$ e o avanço de corte de $f_n=0,075\text{mm/rot}$ foram os parâmetros utilizados.

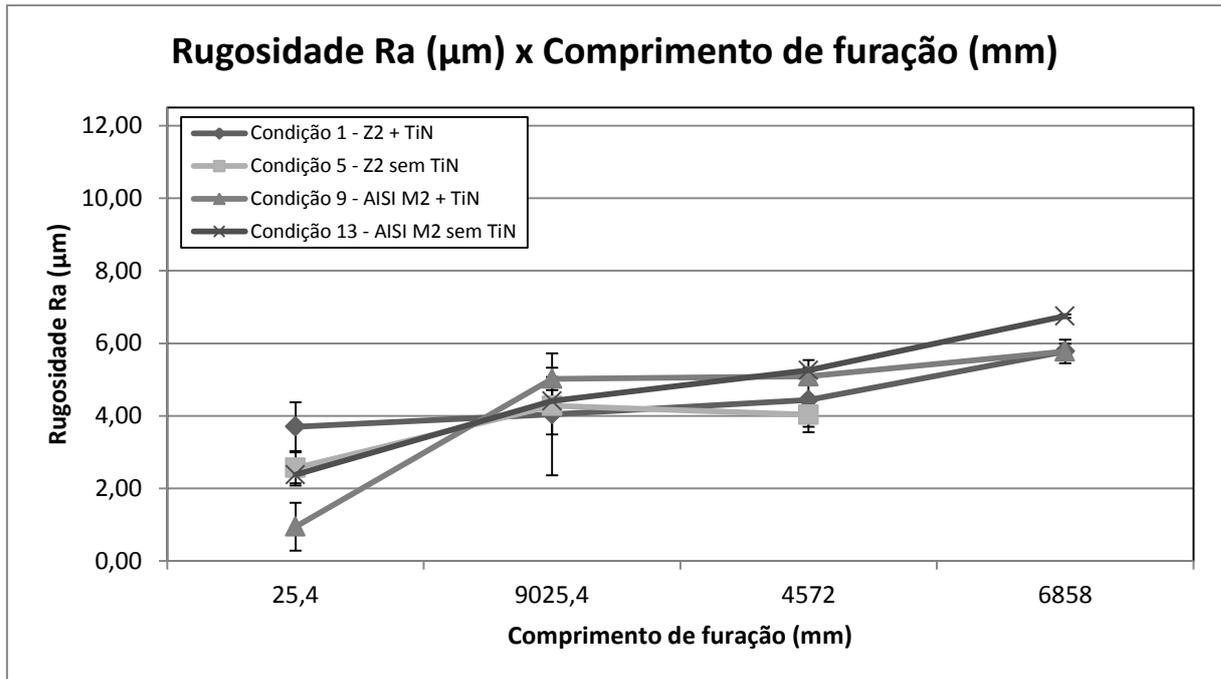


Figura 5.21 Rugosidade Ra para as condições de teste 1, 5, 9 e 13 com $V_c=20\text{m/min}$ e $f_n=0,075\text{mm/rot.}$

Foram observados valores menores de rugosidade para a condição 1 (Z2 com TiN) em relação à condição 5 (Z2 sem TiN) para o comprimento de 4572mm. Esta diferença pode ser atribuída ao revestimento de TiN aplicado sobre a ferramenta.

O valor de rugosidade para as brocas nas condições 9 (AISI M2 com TiN) em relação à condição 13 (AISI M2 sem TiN), para o comprimento de 6858mm, se mostrou inferior em 16%, como era esperado, devido a presença do revestimento aplicado sobre a ferramenta.

Não foram observadas diferenças significativas entre os valores de rugosidade da condição 1 (Z2 com TiN) em relação à condição 9 (AISI M2 com TiN). Já para a condição 5 (Z2 sem TiN) foi observada uma rugosidade 30,27% superior em relação à condição 13 (AISI M2 sem TiN).

Na Figura 5.22 estão os valores de rugosidade para as condições 2, 6, 10 e 14. Nestas condições, a velocidade de corte utilizada foi de $V_c=20\text{m/min}$, e o avanço de corte de $f_n=0,110\text{mm/rot.}$

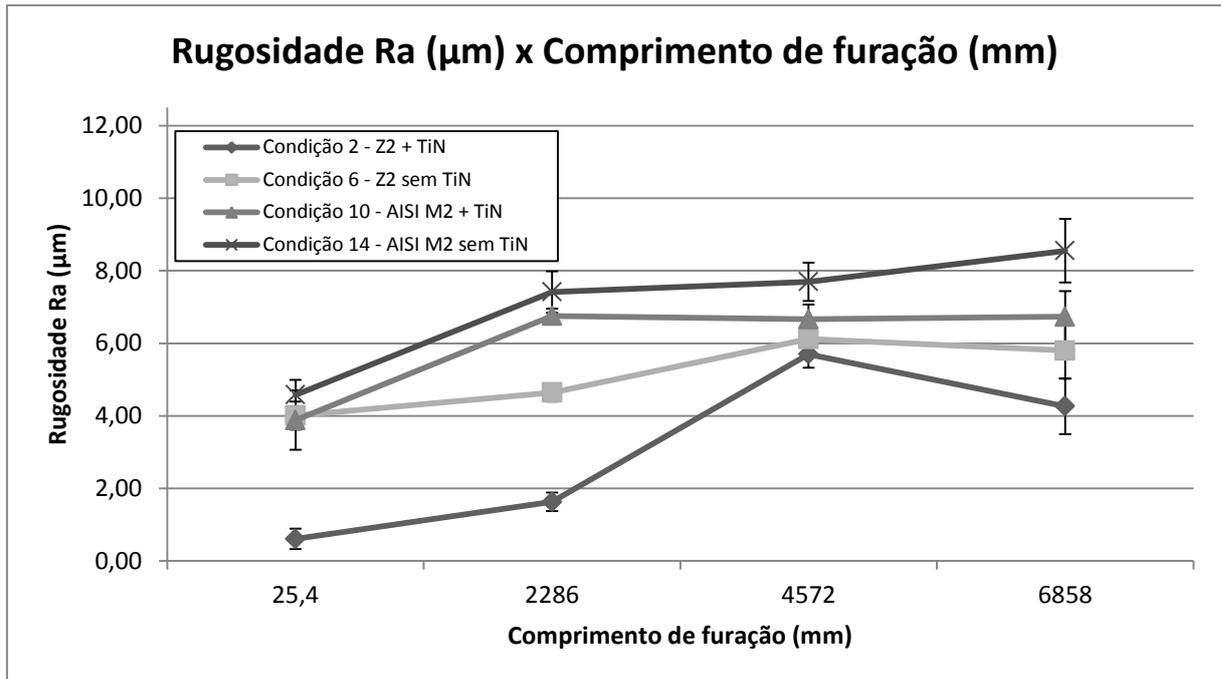


Figura 5.22 Rugosidade Ra para as condições de teste 2, 6, 10 e 14 com $V_c=20\text{m/min}$ e $f_n=0,110\text{mm/rot.}$

Foram observados menores valores de rugosidade para a condição 2 (Z2 com TiN) quando comparado com a condição 6 (Z2 sem TiN) em 36% para todo o comprimento usinado. Para a condição 10 (AISI M2 com TiN), a rugosidade foi 27% inferior em relação à condição 14 (AISI M2 sem TiN). Para ambas as condições, a menor rugosidade obtida foi relacionada com a presença do revestimento de TiN.

Quando o comparativo foi realizado entre as condições 2 (Z2) e 10 (AISI M2), ambas com TiN, a rugosidade obtida para a condição 2 foi 58% inferior em relação à condição 10. Quando a análise contempla a condição 6 (Z2) em relação à condição 14 (AISI M2), ambas sem TiN, a condição 14 apresentou 45,4% de rugosidade superior em relação à condição 6.

No entanto, todos os valores obtidos de rugosidade para estas condições, podem ser enquadrados na classe IT9, referência para o processo de furação, que abrange valores até $12,5\ \mu\text{m}$.

Na Figura 5.23 estão as condições de teste 3, 7, 11 e 15 executados com os parâmetros de corte de $V_c=30\text{m/min}$ para a velocidade de corte e $f_n=0,075\text{mm/rot}$ para o avanço de corte.

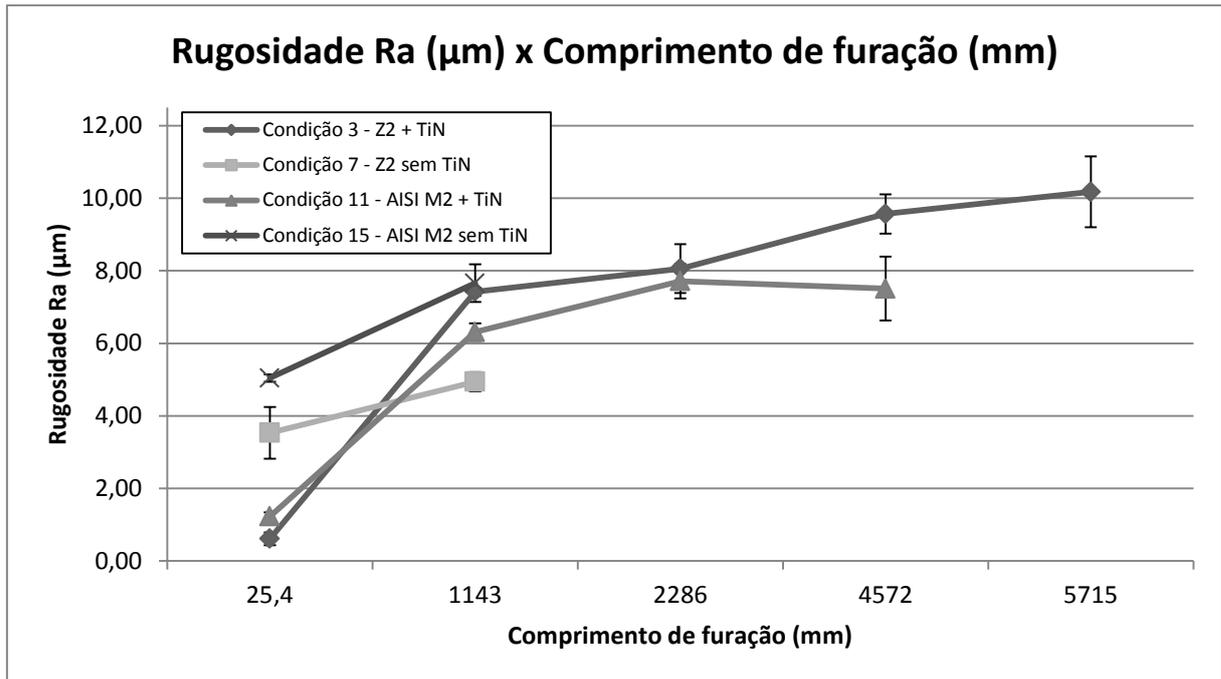


Figura 5.23 Rugosidade Ra para as condições de teste 3, 7, 11 e 15 com $V_c=30\text{m/min}$ e $f_n=0,075\text{mm/rot.}$

O comparativo entre a condição 3 (Z2 com TiN) e condição 7 (Z2 sem TiN) foi comprometido em função do pouco comprimento usinado em relação às brocas sem TiN, devido ao seu desgaste abrasivo acentuado.

Para o comparativo entre a condição 11 (AISI M2 com TiN) e 15 (AISI M2 sem TiN) ocorreu o mesmo comprometimento em função do desgaste agressivo.

No entanto, a comparação entre a condição 3 (Z2 com TiN) e 11 (AISI M2 com TiN) apresentou uma rugosidade superior da condição 3, de 27,4%. Quando comparamos a condição 7 (Z2 sem TiN) em relação à condição 15 (AISI M2 sem TiN) a rugosidade observada foi 55% superior para a condição 15, considerando o mesmo comprimento usinado.

Como observado nas condições de teste anteriores, os valores de rugosidade não ultrapassaram 12,5 microns, uma qualidade aceitável para o processo de furação.

Na Figura 5.24 são apresentados os valores de rugosidade com os parâmetros de corte de $V_c=30\text{m/min}$ para a velocidade de corte e de $f_n=0,110\text{mm/rot}$ para o avanço de corte para as condições 4, 8, 12 e 16.

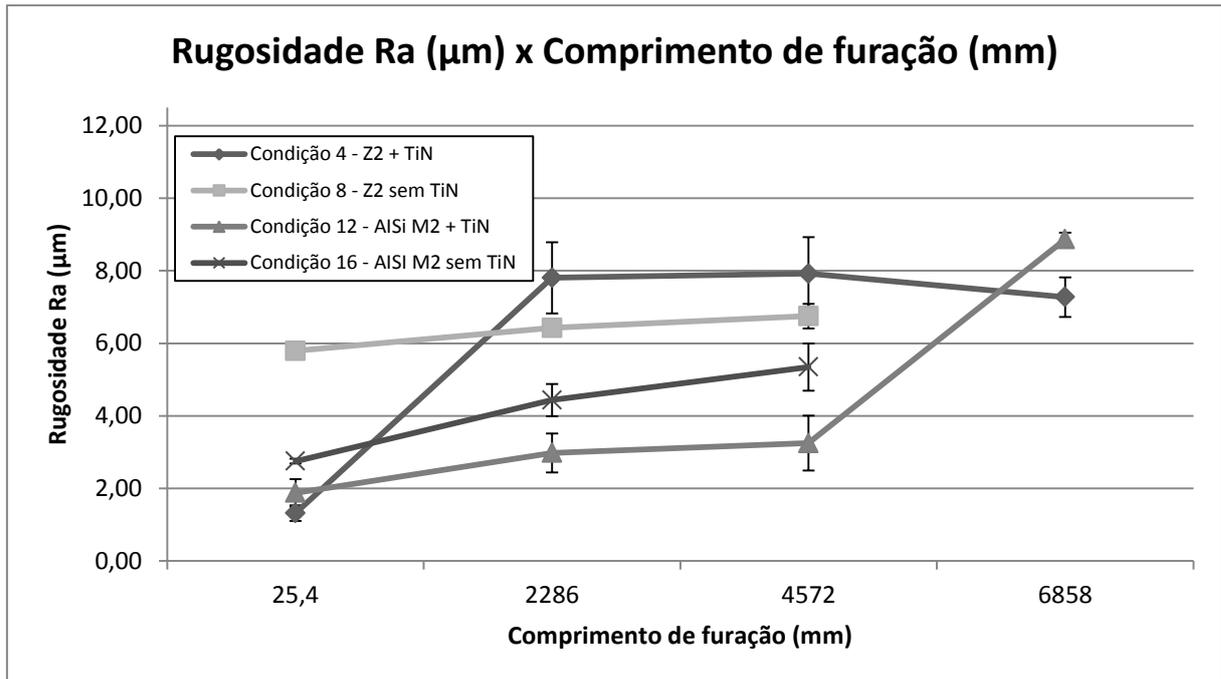


Figura 5.24 Rugosidade Ra para as condições de teste 4, 8, 12 e 16 com $V_c=30\text{m/min}$ e $f_n=0,110\text{mm/rot.}$

No comparativo entre as condições 4 (Z2 com TiN) e 8 (Z2 sem TiN), foi evidenciado um valor de rugosidade 17,7% superior da condição 4 em relação à condição 8. Este comportamento foi relacionado com o aumento do desgaste observado para estes parâmetros, devido ao aumento da velocidade de corte e do avanço, o que pode ter gerado um aumento na vibração das ferramentas influenciando no acabamento do furo.

Na comparação das condições 12 (AISI M2 com TiN) e 16 (AISI M2 sem TiN), a rugosidade para a condição 12 foi 64,6% menor em relação à condição 16.

Na comparação entre a condição 4 (Z2 com TiN) e 12 (AISI M2 com TiN), a diferença em termos de rugosidade é ainda superior, sendo que a condição 4 apresenta uma rugosidade 243% superior em relação à condição 12.

A comparação entre a condição 8 (Z2 sem TiN) e 16 (AISI M2 sem TiN), mostrou uma diferença menor, porém, ainda assim, a condição 8 apresentou uma rugosidade superficial 26,16% superior em relação à condição 16.

Entre os resultados obtidos, em todos os comparativos, o AISI M2, seja com revestimento de TiN ou sendo comparado sem o revestimento, mostrou rugosidades inferiores em relação ao Z2.

De qualquer forma, todos os valores de rugosidade estão dentro da faixa de tolerância IT9, até 12,5 microns, uma qualidade adequada para o processo, ficando para o usuário da ferramenta a decisão de qual tipo de utilizar.

5.7.3 Qualidade dos furos - Diâmetro dos furos

Os valores de diâmetro obtidos a partir dos testes de furação foram relacionados com o comprimento de furação. As variações de parâmetros de corte, de material da ferramenta e da presença do revestimento de TiN foram analisados e gerados os gráficos para a avaliação destas diferenças. Os gráficos foram agrupados de acordo com os parâmetros de corte. Foi realizada a avaliação absoluta e também em percentual dos valores de diâmetro, sempre com o objetivo de se atingir o valor mais próximo de 6,35mm.

A Figura 5.25 representa a variação do diâmetro de furação das brocas com e sem revestimento com diferentes materiais de substrato para os parâmetros de velocidade de corte $V_c = 30\text{m/min}$ e avanço de corte $f_n = 0,110\text{mm/rot}$.

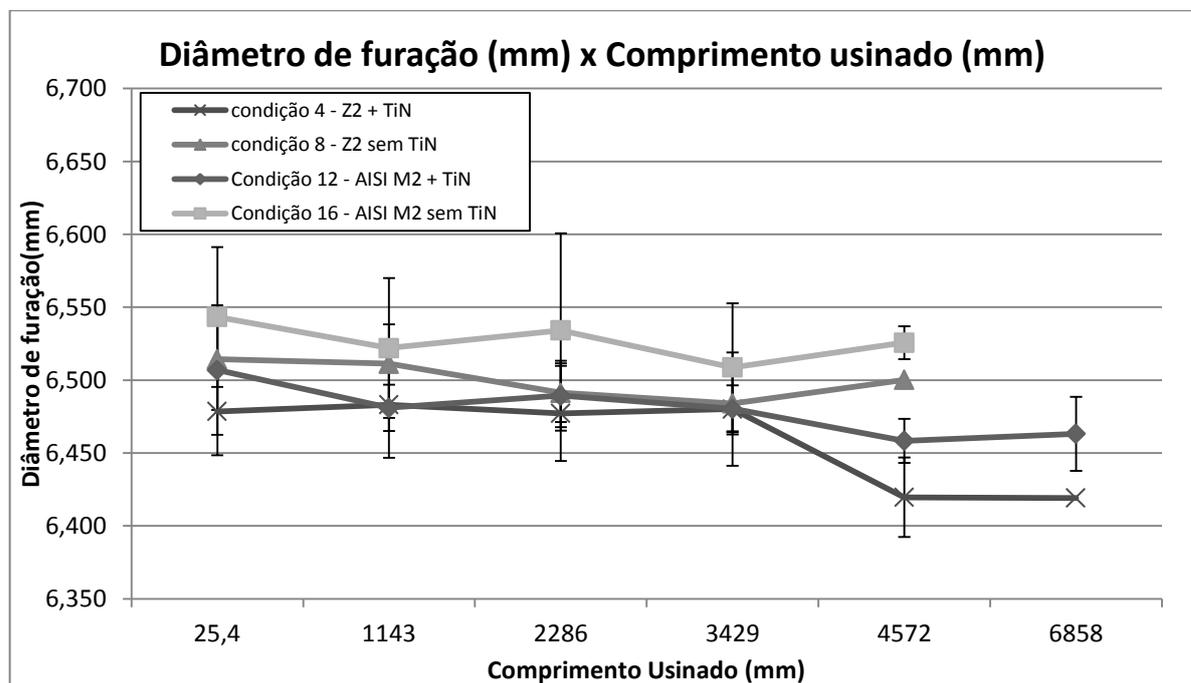


Figura 5.25 Diâmetro de furação em função do comprimento usinado nas condições de teste 4, 8, 12 e 16 com $V_c = 30\text{m/min}$ e $f_n = 0,110\text{mm/rot}$.

Na comparação da condição 4 (Z2 com TiN) em relação à condição 8 (Z2 sem TiN) foi observado um diâmetro de furação 1,2% superior para a condição 8. Isto representa 0,15mm de aumento de diâmetro do furo em relação ao diâmetro da ferramenta. Esta relação

pode ser considerada coerente devido a presença do TiN na condição 4, sendo que esta diferença pode ser atribuída ao revestimento da ferramenta, que diminui a incidência de desgaste, em função da menor força necessária na furação, a diminuição do coeficiente de atrito e a conseqüente diminuição da vibração da ferramenta. O desgaste progressivo entre as arestas de corte também pode ter contribuído para menores diferenças nos valores de diâmetro.

Quando comparadas as condições 12 (AISI M2 com TiN) e 16 (AISI M2 sem TiN) a mesma tendência ao aumento do diâmetro para as brocas sem revestimento foi observada, sendo que a condição 16 apresentou um diâmetro de furação 1,05% superior em relação a condição 12, o que representa 0,176 mm no diâmetro de furação.

Ao observar as condições 4 (Z2 com TiN) e 12 (AISI M2 com TiN) foi notada uma proximidade muito grande em relação ao diâmetro obtido, sendo a condição 12 superior em 0,59% em relação à condição 4, representando 0,038 mm no diâmetro de furação.

Na observação das condições 8 (Z2 sem TiN) e 16 (AISI M2 sem TiN) foi constatado um aumento do diâmetro de 0,04% da condição 16 em relação a condição 8, representando 0,026 mm.

Estas diferenças podem ser significativas, dependendo o nível de tolerância adotado para a análise de furação, pois a variação obtida chegou a 0,176 mm para a maior diferença e de 0,026 mm para a menor diferença.

O melhor escoamento do cavaco bem como o menor desgaste gerado pelas ferramentas com revestimentos pode ser atribuído como sendo um dos principais fatores para o menor diâmetro obtido ao longo da usinagem destas condições. O aumento entre as diferenças entre as arestas de corte ao longo da usinagem também pode ter interferido no diâmetro gerado pelas brocas.

Na Figura 5.26 o parâmetro de corte alterado foi velocidade de corte da ferramenta, de $V_c = 30\text{m/min}$ para $V_c = 20\text{m/min}$, mantendo o avanço de corte em $f_n = 0,110\text{mm/rot}$.

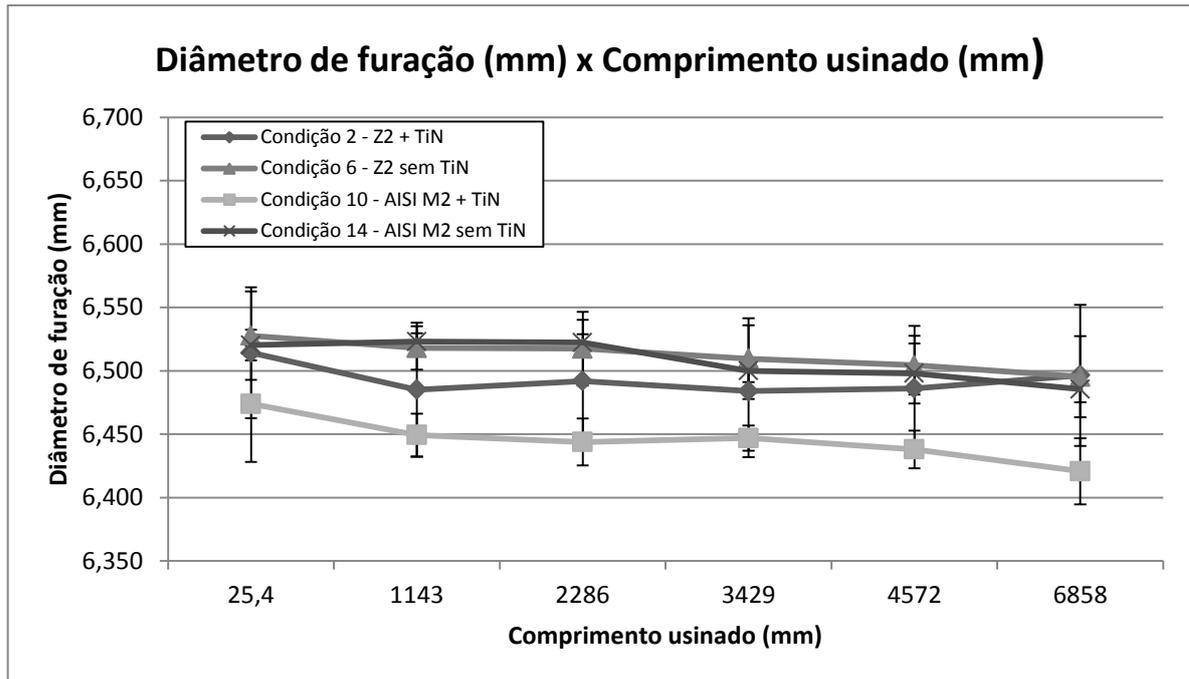


Figura 5.26 Diâmetro de furação em função do comprimento usinado nas condições de teste 2, 6, 10 e 14 com $V_c=20\text{m/min}$ e $f_n=0,110\text{mm/rot.}$

No comparativo entre as condições 2 (Z2 com TiN) e 6 (Z2 sem TiN) foi observado que o diâmetro obtido para estas condições, no comprimento de furação de 6858 mm, não apresentaram diferenças. No entanto, para o comprimento de furação 4572 mm, a condição 2 obteve um diâmetro de furação 0,27% superior em relação à condição 6, representando 0,018 mm.

Quando a análise contempla as condições 10 (AISI M2 com TiN) e 14 (AISI M2 sem TiN) foi verificado um diâmetro 1,01% superior da condição 14 em relação a condição 10, representando 0,065 mm.

Estes valores eram esperados devido à presença do TiN, o que reduz o coeficiente de atrito e também desenvolve uma melhora do fluxo do cavaco ao longo do canal, reduzindo a possibilidade de adesão e também de vibração na ferramenta.

Agora, para o comparativo entre as condições 2 (Z2) e 10 (AISI M2), ambas com TiN, a condição 2 apresentou um diâmetro de furação 0,6% superior em relação à condição 10, gerando um aumento de 0,04 mm para o diâmetro de furação.

No comparativo entre as condições 6 (Z2 sem TiN) e 14 (AISI M2 sem TiN) as diferenças não se mostraram significativas, com aumento de 0,15% da condição 6 em relação à condição 14, aumentando o diâmetro de furação em 0,01 mm.

Na Figura 5.27 foram utilizados para a velocidade de corte $V_c = 20\text{m/min}$ e para o avanço de corte $f_n = 0,075\text{ mm/rot}$ e as condições observadas foram 1, 5, 9 e 13.

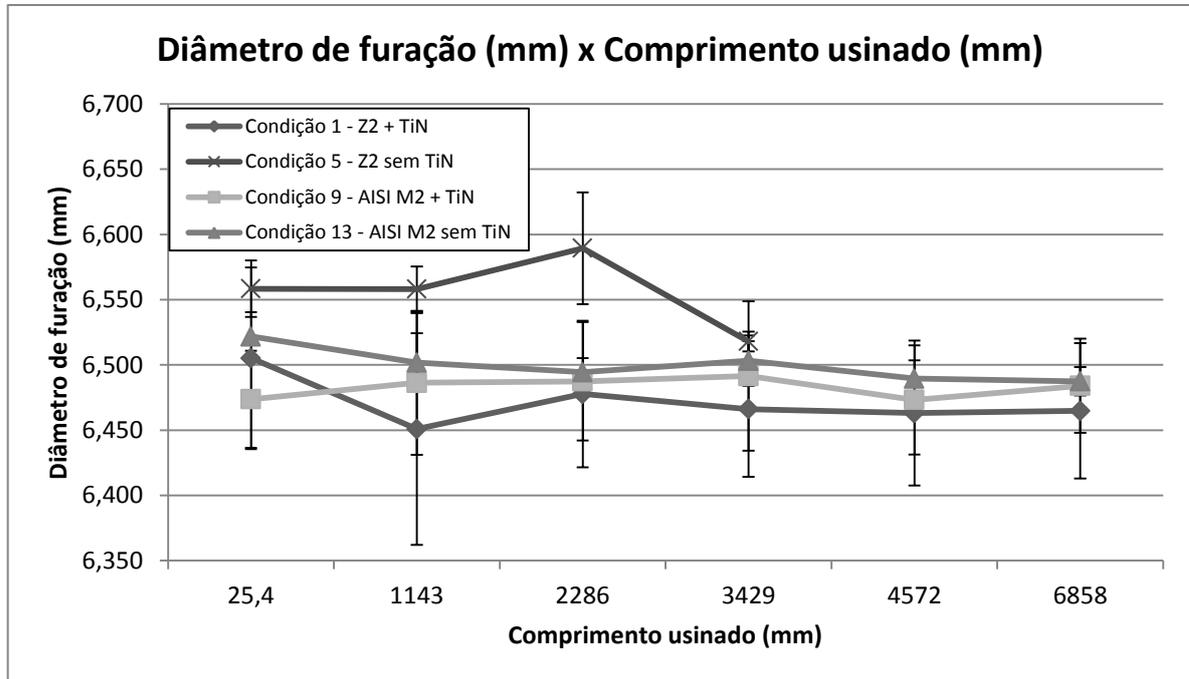


Figura 5.27 Diâmetro de furação em função do comprimento usinado nas condições de teste 1, 5, 9 e 13 com $V_c = 20\text{m/min}$ e $f_n = 0,075\text{mm/rot}$.

No comparativo entre as condições 1 (Z2 com TiN) e 5 (Z2 sem TiN) para o comprimento usinado de 1143mm, foi observado um diâmetro 1,03% superior para a condição 5 em relação à condição 1, representando 0,067 mm.

Para a condição 9 (AISI M2 com TiN) em relação à condição 13 (AISI M2 sem TiN) não foram observadas diferenças significativas em relação aos diâmetros obtidos.

Porém, quando são comparadas as condições 1 (Z2 com TiN) e 9 (AISI M2 com TiN) o diâmetro médio verificado para a condição 9 se mostrou 0,34% superior em relação à condição 1, gerando 0,023 mm de aumento do diâmetro.

Na comparação entre a condição 5 (Z2 sem TiN) e a condição 13 (AISI M2 sem TiN) para o comprimento de 1143mm, a condição 5 apresentou 0,24% de aumento no diâmetro em relação à condição 13, representando 0,016mm.

Na Figura 5.28 foi aumentado o valor de velocidade de corte para $V_c = 30\text{m/min}$ e avanço mantido em $f_n = 0,075\text{mm/rot}$ e analisadas as condições 1, 5, 9 e 13.

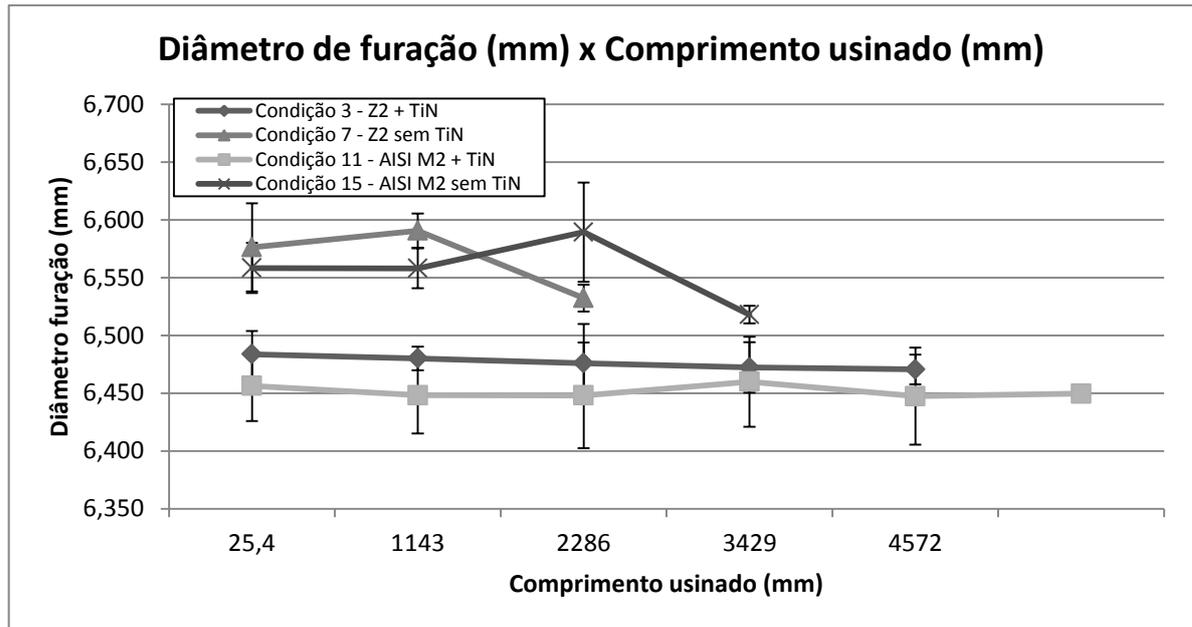


Figura 5.28 Diâmetro de furação em função do comprimento usinado nas condições de teste 3, 7, 11 e 15 com $V_c=30\text{m/min}$ e $f_n=0,075\text{mm/rot.}$

De forma geral, em todos os comparativos, as amostras com revestimentos apresentaram um menor diâmetro de furação, sempre que comparadas com o diâmetro mais próximo possível ao diâmetro da ferramenta, neste caso, 6,35mm. Com as diferenças de diâmetro de furação obtidas entre as amostras com e sem revestimento ao longo da variação dos parâmetros de usinagem foi possível verificar o melhor comportamento, em termos de diâmetro de furação, para as peças com revestimento sendo que o material do substrato não interferiu significativamente no diâmetro de furação.

No entanto, para promover a restrição da utilização de algumas das condições testadas, deve ser avaliado o nível de tolerância exigido para o processo de fabricação ou componente que está sendo analisando, pois, dependendo do caso, os valores não podem ser considerados como não utilizáveis ou talvez, de acordo com a faixa de tolerância do processo, podem até reduzir o número de processos posteriores à furação, como o alargamento, reduzindo assim a quantidade de operações e impactando diretamente no custo e no prazo de entrega dos produtos.

5.7.4 Análise dos modos de falha das ferramentas com TiN

A análise dos mecanismos de desgaste e da qualidade da camada tem como objetivo comparar as peças com revestimento de TiN, principal aplicação dos materiais em estudo. Nas

análises mostradas na Tabela 5.6 observou-se a quantidade de ferramentas que apresentaram falhas pelo mecanismo de adesão, bem como pelo mecanismo de abrasão.

Tabela 5.6 Mecanismos de desgaste, para cada condição, atribuídos às peças com revestimento.

Parâmetros	Mecanismo de desgaste	Z2 com TiN	AISI M2 com TiN
$V_c=20\text{m/min}$ e $F_n=0,075\text{mm/rot}$	Abrasão	1	1
	Adesão	3	3
$V_c=20\text{m/min}$ e $F_n=0,110\text{mm/rot}$	Abrasão	0	3
	Adesão	3	0
$V_c=30\text{m/min}$ e $F_n=0,075\text{mm/rot}$	Abrasão	2	2
	Adesão	1	2
$V_c=30\text{m/min}$ e $F_n=0,110\text{mm/rot}$	Abrasão	2	2
	Adesão	1	1
TOTAL - FALHAS POR ABRASÃO		38,5%	57,1%
TOTAL - FALHAS POR ADESÃO		61,5%	42,9%

Dentre as falhas observadas para o AISI M2 com TiN, 57,1 % estão relacionadas com o desgaste por abrasão, originado no alto atrito do processo de furação e consequente aumento de temperatura que sofre o material.

Na Figura 5.29 (a) observa-se a broca de AISI M2 com TiN, pela sua visualização frontal, onde estão indicadas as regiões com desgaste abrasivo. No ponto 1, o desgaste ocorrido na quina de corte da ferramenta, e no ponto 2, na aresta transversal.

Para as brocas de Z2 com TiN, 61,5% das falhas observadas estão relacionadas aquelas por adesão. Na Figura 5.29 (a) pode-se visualizar o material usinado aderido sobre a aresta transversal de corte, notada no ponto 1 e do material usinado aderido sobre a quina e a aresta principal de corte, observado pelo ponto 2.

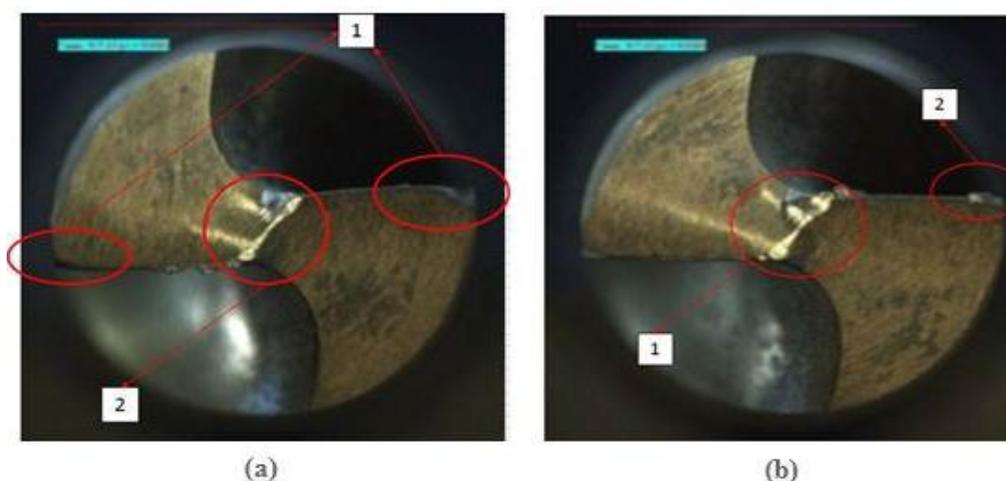


Figura 5.29 Verificação do desgaste por abrasão do AISI M2 com TiN (a) e verificação do desgaste por adesão (b).

O modo de falha observado pode ser relacionado com a falta de adesão do filme de TiN sobre o Z2, verificado pela região da aresta de corte que apresenta alteração microestrutural, sendo caracterizada pela Figura 5.30 (b). Esta zona com alteração microestrutural foi caracterizada com um baixo valor de dureza, entre 60,5 e 60,9 HRC, sendo que o material, antes do processo de furação, apresentava valores entre 64,3 e 64,5 HRC, podendo ser observada na Figura 5.30 (a), e que a DIN 1414 (2004) recomenda valores entre 63 e 65HRC para brocas helicoidais.

Esta redução de dureza combinada com a alteração microestrutural, devido ao revenido promovido na aresta de corte, onde as temperaturas de processo podem ter ultrapassado os 550°C, recomendados para o processo, acabaram reduzindo a sua capacidade de ancoragem do revestimento, ocasionando o deslocamento do TiN ao longo do contato da ferramenta com a superfície do material durante os testes de furação.

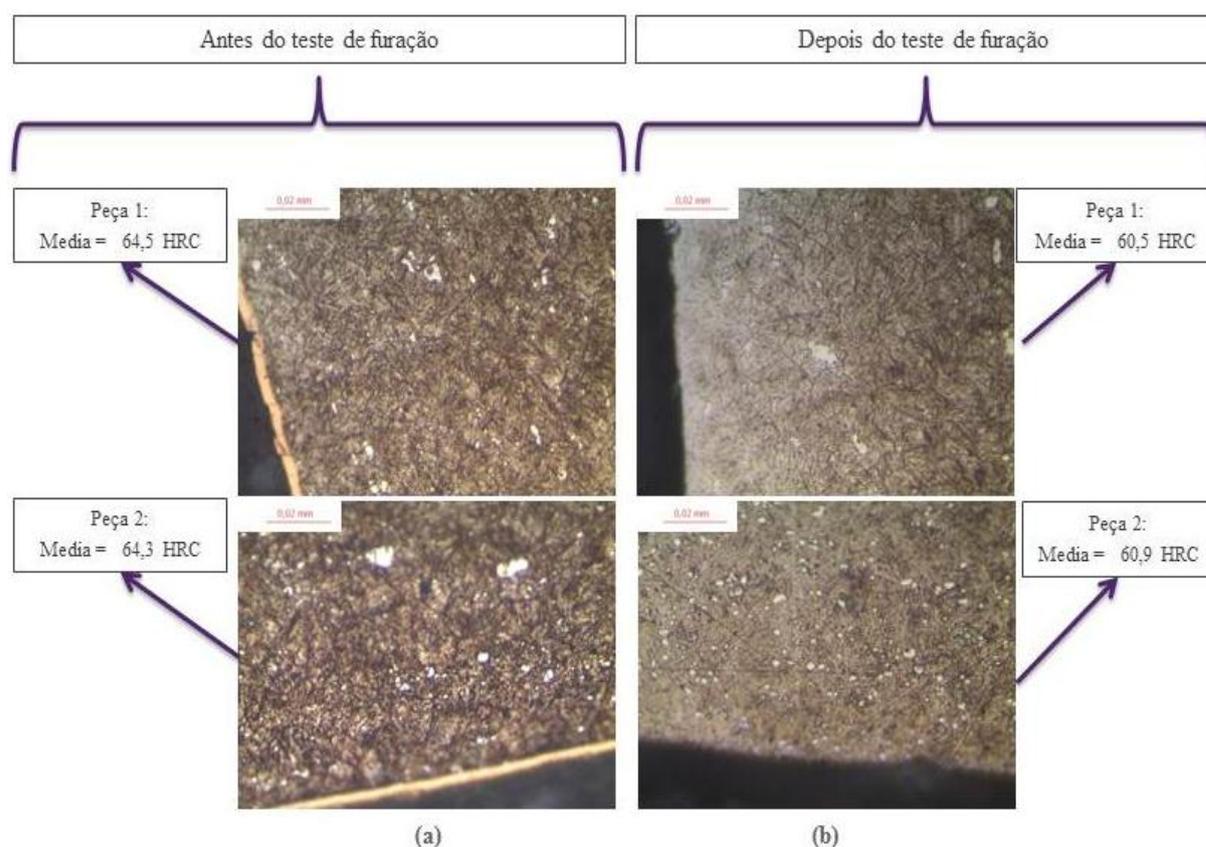


Figura 5.30 Brocas com substrato de Z2, antes do teste de furação (a) e alteração microestrutural da aresta de corte ocorrida após o teste de furação (b) no aço Z2.

A menor resistência ao revenido do aço Z2 pode ser relacionada com a menor quantidade de elementos de liga presentes no material, quando comparado ao AISI M2,

reduzindo assim a sua capacidade de geração de carbonetos MC, M₂C e M₆C, que encontram-se finamente distribuídos na microestrutura após o tratamento de têmpera e revenido.

Esta relação com os elementos de liga fica evidente quando são analisados os percentuais de W e Mo. Para o AISI M2, 6,09% de W e 4,80% de Mo e para o Z2, 2,97% de W e 3,35% de Mo. Para o W uma quantidade 105% maior e para o Mo um percentual 43,3% acima no AISI M2 em relação ao Z2.

Esta diferença na composição química, que afeta a resistência ao revenido do material, resultou no revenimento do substrato, podendo ser associada às falhas encontradas no Z2, onde foi observada uma redução de dureza e maior dispersão de carbonetos na matriz, provocando assim uma menor capacidade de ancoragem (capacidade de sustentação de carga) do revestimento, causando a deformação plástica do substrato e o deslocamento do filme de TiN sobre o Z2.

A proximidade na razão de dureza pelo módulo de elasticidade (H/E) do material em relação ao substrato e conseqüente diminuição desta razão conforme ocorre o processo de furação, devido ao aumento de temperatura, pode contribuir para justificar a redução da adesão do filme de TiN sobre o Z2, fato que não ocorreu para o AISI M2, devido a sua dureza manter-se durante o processo de furação. Com o aumento de temperatura, o revenimento promovido nas arestas de corte tem como conseqüência a redução de dureza e na capacidade de ancoragem do revestimento.

Para a verificação da eficiência da aplicação do filme PVD sobre as ferramentas foram realizados ensaios de adesão do revestimento sobre o substrato. Para tal, utilizou-se o método VDI 3198, onde são comparadas as indentações realizadas e classificadas em termos de microtrincas formadas.

A Figura 5.31(a) mostra o padrão de indentação realizado sobre o filme PVD de TiN aplicado sobre o aço AISI Z2 que foi disposto na classe H1/H2, considerado como satisfatório para este tipo de ferramenta. Na Figura 5.31 (b) observa-se o ensaio de adesão do filme de TiN sobre o substrato de AISI M2, onde classifica-se em H3 e avaliado como satisfatório para o nível de adesão do revestimento.

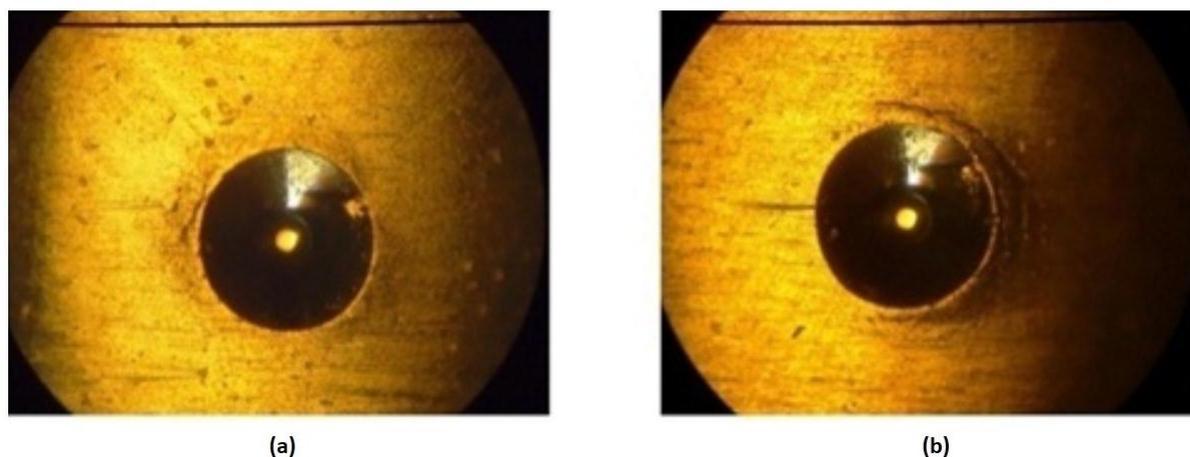


Figura 5.31 (a) Ensaio de adesão de TiN sobre o substrato de Z2 e (b) Ensaio de adesão de TiN sobre o substrato de AISI M2.

A avaliação da aderência foi complementada pelo ensaio de riscamento onde analisou-se a trilha do penetrador sobre as amostras. Os resultados, para a força crítica de delaminação, podem ser observados na Tabela 5.7. Para o filme de TiN sobre o AISI M2, o valor médio obtido foi de 68,2 N e para o TiN sobre o Z2 o valor médio encontrado foi de 62,4 N, uma diferença de 8,63%, que pode ser considerada significativa. O valor inferior, observado para o Z2, pode ter influenciado na adesão do filme de TiN, contribuindo assim para as falhas observadas nos ensaios de furação resultando na menor quantidade de furos realizados.

Tabela 5.7 Verificação da força de aderência das amostras com revestimento de TiN.

Avaliação da força crítica de delaminação da camada de TiN			
Substrato	Carga crítica (N)	Média	Desvio
AISI M2	67,3	68,3	0,88
	69,0		
	68,7		
Z2	62,7	62,4	2,34
	64,7		
	60,0		

Já para as trilhas de riscamento, foram observadas as marcas deixadas pelo indentador e relacionadas com os filmes aplicados. Para as trilhas realizadas no revestimento de TiN aplicado sobre o AISI M2, pode-se constatar deformações plásticas nas laterais das trilhas, sendo caracterizadas como uma falha coesiva, onde o material tende a deformar, porém, o substrato não fica exposto, como pode ser observado nas marcas da Figura 5.32, com aumento de 100x, onde fica explícita esta característica, e na Figura 5.33, com aumento de 500x, as deformações do substrato torna-se mais evidentes.

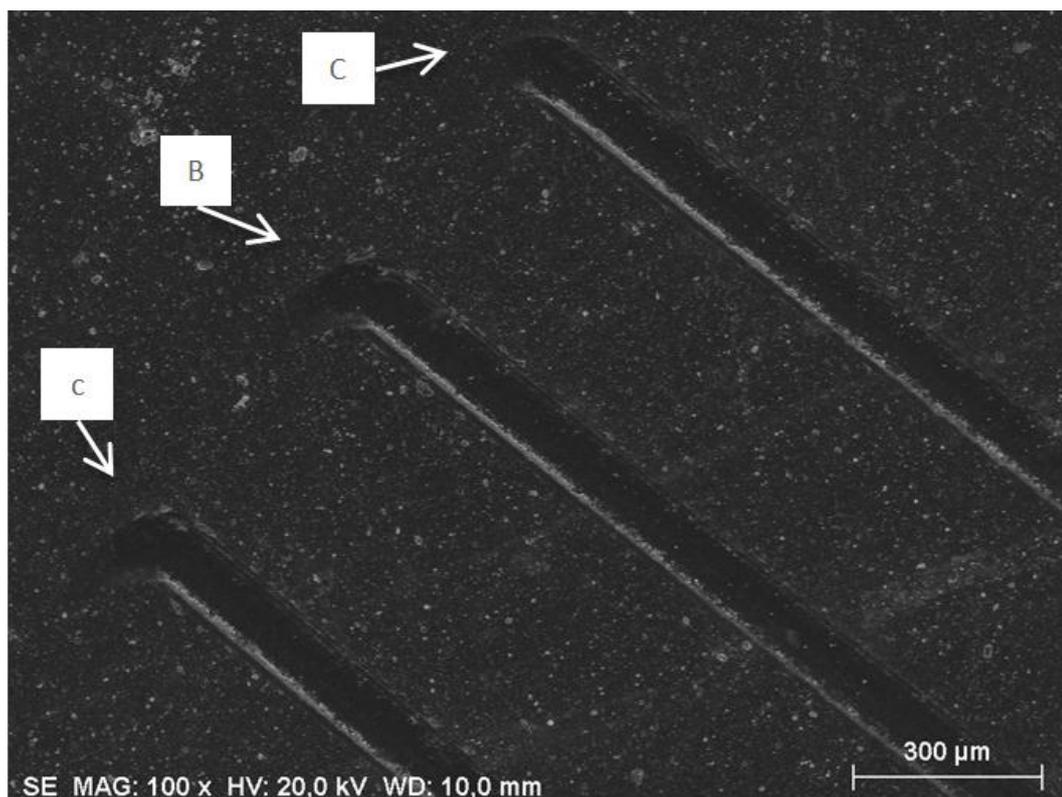


Figura 5.32 Trilhas de riscamento observadas por MEV, com aumento de 100x, para o TiN aplicado sobre o AISI M2.

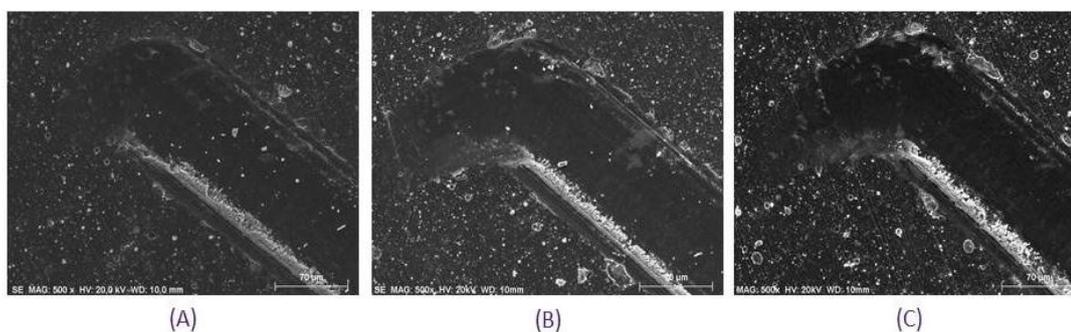


Figura 5.33 Trilhas de riscamento com aumento de 500x observadas pelo MEV para o TiN sobre o AISI M2, detalhando a parte final dos riscos.

No entanto, quando foram analisadas as trilhas de riscamento Figura 5.34, com aumento de 100x, relativas ao revestimento de TiN aplicado sobre o substrato de Z2, foram observados alguns deslocamentos laterais ao longo dos riscos, tendo ocorrido, nestes casos, a exposição do substrato em várias etapas das trilhas. Esta característica pode ser associada com a falha adesiva do revestimento sobre o Z2. Na Figura 5.35, onde as mesmas trilhas são detalhadas com aumento de 500x, alguns pontos são marcados para evidenciar o deslocamento ocorrido.

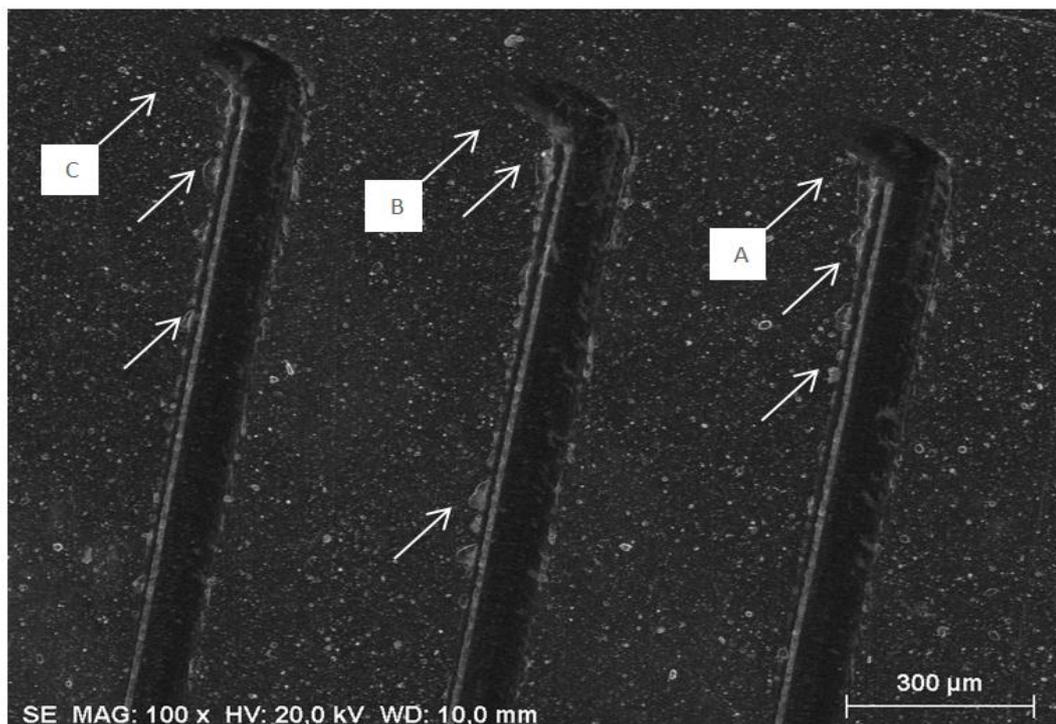


Figura 5.34 Trilhas de riscamento observada por MEV, com aumento de 100x, para o TiN aplicado sobre o Z2.

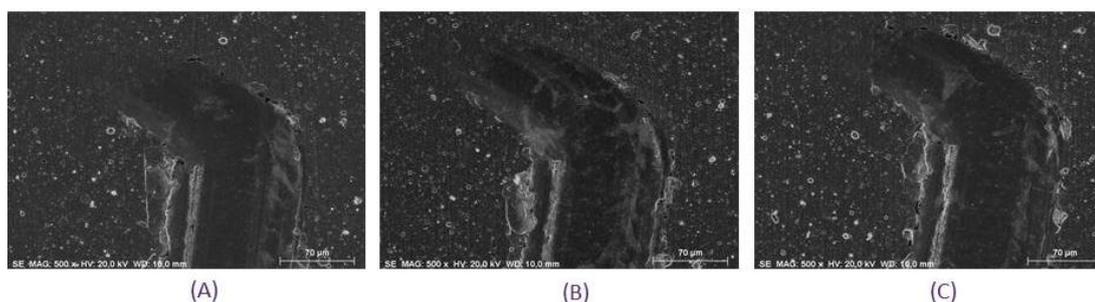


Figura 5.35 Trilhas de riscamento com aumento de 500x observadas pelo MEV, para o TiN sobre o Z2, detalhando a parte final dos riscos.

Portanto, com as observações relacionadas à capacidade do revestimento aderir-se sobre o substrato, fica evidente a maior adesão do filme de TiN sobre o AISI M2 quando comparado ao Z2, evidenciando a sua menor capacidade de suportar as forças e temperaturas atuantes no processo de furação, contribuindo para justificar os resultados observados durante os experimentos de furação.

O menor percentual de vanádio presente no aço Z2 (1,41%) em comparação com o AISI M2 (1,76%) e a conseqüente diminuta quantidade de carbonetos de vanádio presentes no material, combinada com a facilidade na nucleação do filme de TiN devido a presença dos carbonetos de vanádio, a sua afinidade química e a proximidade do valor de parâmetro de

rede ($MC = 0,417 \text{ nm}$ e $TiN=0,422 \text{ nm}$) em relação ao TiN, podem ter colaborado para a melhor adesão do TiN sobre o AISI M2 quando comparado ao Z2.

Mas não somente os carbonetos de vanádio, mas os gerados pelos outros elementos de liga presentes em maior quantidade no AISI M2, como o W, com percentual de 6,09% para o AISI M2 e em 2,97 % para o Z2, quanto para o Mo, presente com 4,80% para o AISI M2 e somente 3,35% para o Z2, elementos associados à geração dos carbonetos M_2C , M_6C e o $M_{23}C_6$, podem também ter contribuído para facilitar a nucleação do filme de TiN, devido a semelhança de seu parâmetro de rede ao do revestimento.

Outra observação em relação ao processo de revestimento das amostras (realizado em forno industrial), onde mesmo com vácuo e certa pressão na câmara do forno, torna possível a presença de óxidos sobre os substratos. A maior susceptibilidade à formação de óxidos do Z2 em comparação com o AISI M2, promovida pelos carbonetos originados nos elementos de liga (Mo, W, V) presentes em menor quantidade no Z2, tendo como consequência uma menor área superficial coberta pelos carbonetos, que tem como característica serem menos ativos quimicamente, podendo assim, ter contribuído para a menor adesão do filme sobre o Z2 em comparação ao AISI M2.

A presença destes óxidos, que foram observados nos ensaios sobre revestimentos de TiN aplicados em substrato de HSS, realizados por **Kiekhaw et al (2006)**, onde a presença dos óxidos superficiais foi verificada por XPS. Quando estão presentes na superfície do substrato durante a aplicação do revestimento, diminuem a capacidade de adesão do TiN, e ao ser comparada ao substrato com os óxidos removidos, aumenta significativamente a capacidade de adesão do revestimento. Este mesmo direcionamento também foi proposto por **Abisset et al (1998)**, onde o autor cita a diminuição da adesão do revestimento sobre o substrato por verificar a presença de óxidos superficiais.

Em consequência as observações realizadas, as brocas com substrato de AISI M2 com filme de TiN apresentaram, para todas as condições testadas, quantidade de furos maior e menor taxa de desgaste, quando comparadas às brocas de Z2 com TiN. Estes valores podem ser observados na Figura 5.36, onde destaca-se, para a condição mais agressiva do ensaio, com $V_c=30\text{m/min}$ e $f_n= 0,110\text{mm/rot}$, a condição 12 (AISI M2 com TiN) com 480 furos, 113% superior em relação à condição 4 (AISI M2 com TiN), onde foram produzidos 225 furos.

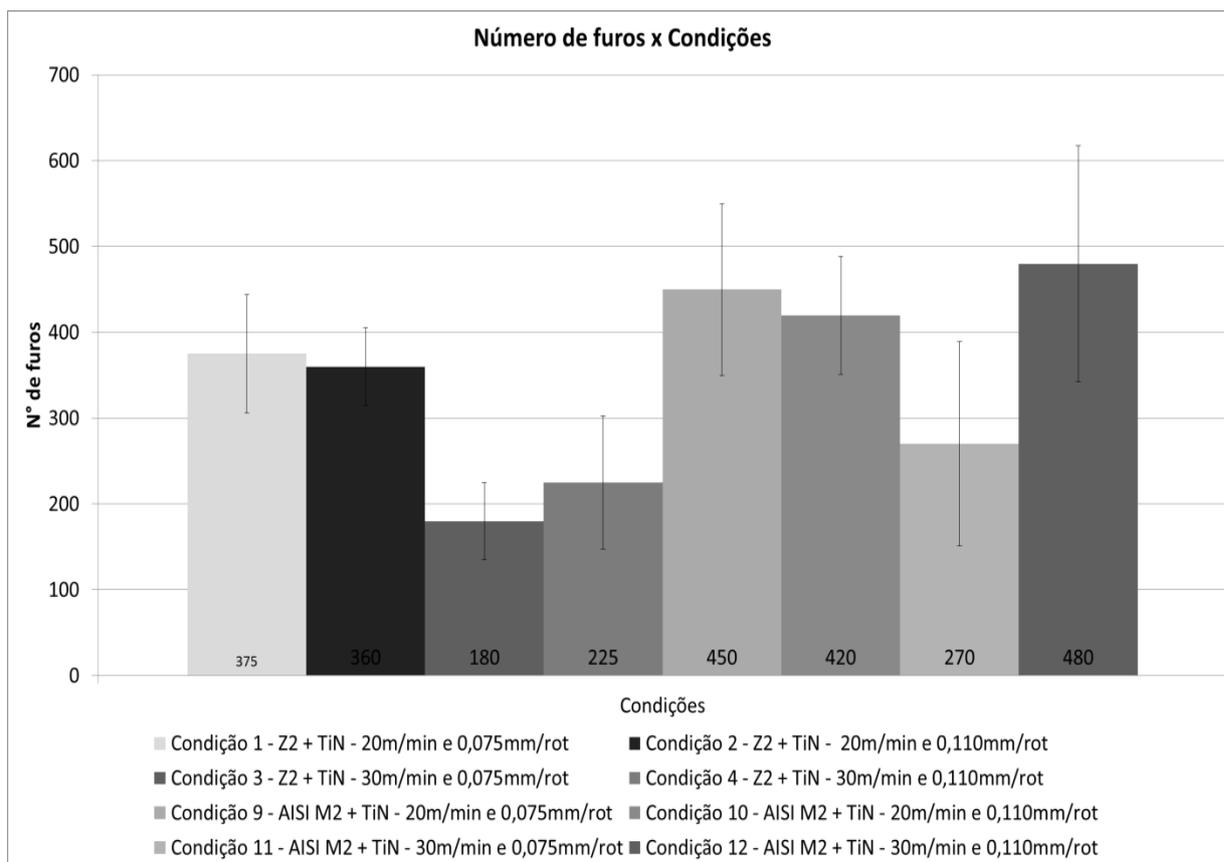


Figura 5.36 Comparativo da quantidade de furos entre as brocas em AISI M2 e Z2 para todos os parâmetros de corte.

5.7.5 Análise geral dos resultados

Uma análise geral dos resultados pode ser verificada na Tabela 5.8, bem como os comentários relativos às observações, sendo divididos de acordo com os critérios selecionados no trabalho como significativos. Inicialmente, estão as observações relacionadas ao desgaste e a quantidade de furos realizados, em seguida as observações relacionadas ao diâmetro de furação, sendo que as comparações foram realizadas com o objetivo de se obter o valor mais próximo ao diâmetro da ferramenta (6,35mm) e em relação à rugosidade superficial as medições foram realizadas com o objetivo de se obter o menor valor possível, em microns, dentro da escala Ra.

Tabela 5.8 Análise geral dos resultados para os testes realizados, divididos pelos parâmetros de corte.

Critérios	Condições gerais	$V_c = 30$ m/min e $f_n = 0,110$ mm/rot	$V_c = 30$ m/min e $f_n = 0,075$ mm/rot	$V_c = 20$ m/min e $f_n = 0,110$ mm/rot	$V_c = 20$ m/min e $f_n = 0,075$ mm/rot	Condição	Pontuação	Melhor situação	
Desgaste e número de furos	Substratos diferentes com revestimento	AISI M2 ↑	AISI M2 ↑	AISI M2 ↑	sem diferenças	AISI M2	3	AISI M2	
						Z2	0		
	Substratos diferentes sem revestimento	sem diferenças	AISI M2 ↑	Z2 ↑	AISI M2 ↑		AISI M2	2	AISI M2
						Z2	1		
	Substratos iguais com e sem revestimento	sem diferenças	com TiN ↑	sem diferenças	sem diferenças	sem diferenças	Com TiN	1	Com TiN
						Sem TiN	0		
Rugosidade e superficial	Substratos diferentes com revestimento	AISI M2 ↑	AISI M2 ↑	Z2 ↑	sem diferenças	AISI M2	2	AISI M2	
						Z2	1		
	Substratos diferentes sem revestimento	AISI M2 ↑	Z2 ↑	Z2 ↑	AISI M2 ↑		AISI M2	2	Semelhante
						Z2	2		
	Substratos iguais com e sem revestimento	com TiN ↑	Não avaliado	com TiN ↑	com TiN ↑		Com TiN	3	Com TiN
						Sem TiN	0		
Diâmetro de furação	Substratos diferentes com revestimento	Z2 ↑	AISI M2 ↑	AISI M2 ↑	Z2 ↑	AISI M2	2	Semelhante	
						Z2	2		
	Substratos diferentes sem revestimento	Z2 ↑	AISI M2 ↑	AISI M2 ↑	AISI M2 ↑		AISI M2	3	AISI M2
						Z2	1		
	Substratos iguais com e sem revestimento	com TiN ↑	com TiN ↑	sem TiN ↑	com TiN ↑		Com TiN	3	Com TiN
						Sem TiN	1		

Legenda: ↑ = Melhor desempenho

- $V_c = 20$ m/min e $f_n = 0,075$ mm/rot:

Para as brocas com e sem revestimento e mesmo substrato: Não foram observadas diferenças significativas para o desgaste. As brocas com revestimento apresentaram uma rugosidade inferior em relação as sem revestimento. Notou-se diâmetros mais distantes de 6,35mm para as brocas sem TiN.

Para as brocas sem revestimento e substratos diferentes: As peças em Z2 apresentaram menor desgaste quando comparado com as peças de AISI M2. O AISI M2 mostrou menos rugosidade e diâmetro de furação mais próximo à 6,35mm.

Para as brocas com revestimento e substratos diferentes: Não foram observadas diferenças para o desgaste e para a rugosidade das ferramentas. O Z2 gerou diâmetro de furação mais próximo à 6,35mm;

- $V_c=20\text{m/min}$ e $f_n=0,110\text{mm/rot}$:

Para as brocas com e sem revestimento e mesmo substrato: Não foram observadas diferenças significativas em relação ao desgaste. Foram verificadas rugosidades menores para as brocas com revestimento e obtidos diâmetros de furação mais distantes de 6,35mm para as condições sem revestimento.

Para as brocas sem revestimento e substratos diferentes: Notou-se que o desgaste das brocas em Z2 foi superior em 31,6%. A rugosidade das brocas em Z2 foi menor. O Z2 apresentou diâmetro de furação mais distante à 6,35mm.

Para as brocas com revestimento e substratos diferentes: o AISI M2 obteve um desgaste 20% inferior comparado ao Z2. As brocas com Z2 mostraram uma menor rugosidade e o AISI M2 apresentou diâmetro de furação mais próximo à 6,35mm.

- $V_c=30\text{m/min}$ e $f_n=0,075\text{mm/rot}$:

Para as brocas com e sem revestimento e mesmo substrato: As peças com a presença do TiN exibiram desgaste inferior e maior quantidade de furos. A análise de rugosidade para as brocas com o mesmo substrato, com e sem revestimento, foi comprometida devido ao pouco comprimento usinado. As brocas com revestimento apresentaram diâmetro de furação mais próximo à 6,35mm;

Para as brocas sem revestimento e substratos diferentes: O Z2 obteve desgaste 54,7% inferior em relação ao AISI M2. O Z2 mostrou rugosidade menor e o AISI M2 apresentou diâmetro de furação mais próximo à 6,35mm.

Para as brocas com revestimento e substratos diferentes: As peças com AISI M2 apresentaram desgaste menor e quantidade de furos maior. O AISI M2 mostrou uma rugosidade menor e diâmetro de furação mais próximo à 6,35mm;

- $V_c=30\text{m/min}$ e $f_n=0,110\text{mm/rot}$:

Para as brocas com e sem revestimento e mesmo substrato: Não foram observadas diferenças de desgaste significativo. As brocas com revestimento apresentaram menor rugosidade o diâmetro de furação mais próximo à 6,35mm;

Para as brocas sem revestimento e substratos diferentes: Não foram observadas diferenças significativas de desgaste. A rugosidade do AISI M2 foi inferior e o Z2 alcançou diâmetro de furação mais próximo à 6,35mm.

Para as brocas com revestimento e substratos diferentes: Foi observado melhor desempenho do AISI M2, tanto em desgaste quanto em número de furos. O AISI M2 apresentou uma rugosidade inferior e o Z2 apresentou diâmetro de furação mais próximo à 6,35mm.

6. CONCLUSÕES

Os ensaios de furação foram realizados com o objetivo de investigar uma possível substituição do substrato de AISI M2 para Z2, a fim de reduzir os custos com as ferramentas, sendo que as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

O Z2, com os parâmetros de baixa velocidade de corte analisados neste estudo, tem a possibilidade de ser utilizado, sem interferência significativa em seu desempenho, porém, em maiores velocidades de corte, a sua utilização não pode ser recomendada.

As brocas com substrato de AISI M2 e revestimento de TiN apresentaram, em todas as condições testadas, uma maior quantidade de furos realizados e menor taxa de desgaste, quando comparadas às brocas de Z2 com TiN.

O TiN aplicado sobre o Z2 falhou por falta de uma adequada adesão do filme fino ao substrato, o que foi confirmado pelos testes de riscamento.

Os materiais do substrato, seja com ou sem revestimento, para os parâmetros de corte analisados no trabalho, se mostraram equivalentes em relação aos diâmetros dos furos entregues durante o processo de furação. A diferenciação na utilização deve ser considerada de acordo com os critérios dimensionais de projeto ou processo em análise.

Para as brocas com revestimento trabalhando nas maiores velocidades de corte deste estudo, as peças com substrato de AISI M2 obtiveram os menores valores de rugosidade. No entanto, em nenhuma das análises, a faixa de rugosidade máxima de 12,5 microns, indicada para o processo de furação, foi ultrapassada, não servindo, a rugosidade superficial, como critério de restrição para a seleção do material do substrato.

De forma geral, as brocas fabricadas em AISI M2 possuem um desempenho superior em relação ao material Z2, seja em termos de desgaste da ferramenta, seja em quantidade de furos realizados, critério fundamental para a produtividade das empresas, mesmo que para o diâmetro de furação e para a rugosidade superficial, alguns casos se mostraram equivalentes.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros ficam as seguintes possibilidades:

- Avaliação de outros tipos de revestimento combinados com o substrato de aço Z2, como TiAlN e Al₂O₃, em função da sua grande utilização como revestimentos em aços rápidos;
- Realizar ensaios com o monitoramento de outras variáveis de saída, como a vibração, a força e o torque durante o processo de furação, bem como a realização de ensaios complementares, como o MEV e EDS para a melhor identificação dos mecanismos de falha;
- Teste com outros materiais de substrato, com o objetivo de aumentar a gama de alternativas para a fabricação das ferramentas;
- Avaliar a aplicação de nitretação à plasma associado ao revestimento aplicado sobre o aço Z2.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABISSET S.; MAURY F.; FEURER R.; DUCARROIR M.; NADAL M.; e ANDRIEUX M. **Gas and plasma nitriding pretreatments of steel substrates before CD growth of hard refractory coatings.** Thin Solid Films, n.315, p. 179-185, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM A 600. Standard specification for tool steel high speed.** 1993, 14pg.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM E-112. Standard test methods for determining average grain size.** 1988, 26pg.

AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro.** Dissertação de Mestrado. UFRGS. Porto Alegre, 2002.

ANDRADE, C. L. F. **Análise da furação do ferro fundido vermicular com brocas de metal-duro com canais retos revestidas com TiN e TiAlN.** Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica. USFC. Florianópolis, 2005.

ANDRADE, M. F. **Análise da morfologia e da resistência ao desgaste de revestimentos TiAlSiN efectuados por PVD.** Dissertação. Faculdade de engenharia da Universidade do porto, 2008.

ANTUNES, R. **Caracterização do Comportamento Frente à Corrosão de um Aço Inoxidável Austenítico para Aplicações Biomédicas com Revestimentos de PVD de TiN, TiCN e DLC.** Tese de Doutorado. IPEN. São Paulo, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **ASM Metals handbook. Vol. 4. Heat treating.** ASM international, 10ª. Ed., Metals Park, OH. p. 2173. 1992.

ARAÚJO, E.G. **Influência das adições de NBC e ligas a base de fósforo na sinterização do aço rápido M2.** Dissertação de Mestrado. IPEN. São Paulo, 1993.

BALZERS, Oerlikon. **Coating guide.** Disponível em: <<http://www.oerlikon.com/ecomaXL/index.php>> Acesso em 24 jul. 2013.

BERG, H. V. D. **A Importância da Escolha do Revestimento e do Projeto da Ferramenta.** Máquinas e Metais, São Paulo, n. 434 p. 28-37, Mar. 2002.

BORK, C. A. **Otimização de variáveis de processo para a furação do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541**. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica. USFC. Florianópolis, 1995.

BLICKWEDE, D. J.; COHEN, M.; ROBERTS, G. **The effect of vanadium and carbon on the constitution of High Speed Steel**. Transaction of the ASM, vol. 42, 1949.

BRAIC, V.; ZOITA, C.N.; BALACEANU, M.; KISS, A. **TiAlN/TiAlZrN multilayered hard coatings for enhanced performance of HSS drilling tools**. Surface and coatings technology. Volume 204, 15 março 2010. Pg. 1925-1928. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.08.011>. Acesso 11 Maio. 2014.

CASTILLO, W. J. G. **Furação Profunda de Ferro Fundido Cinzento GG25 com Brocas de Metal-Duro com Canais Retos**. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

CAVALCANTE, F. J. N. **Análise de Utilização de Broca escalonada de canal reto no processo de furação de uma liga de alumínio utilizada na indústria automotiva**. Dissertação. Universidade federal tecnológica do Paraná, 2010.

CAVALER, L. C. C. **Fresamento periférico do aço AISI –SAE D6 temperado e Revenido utilizando Fresas de Metal Duro**. Dissertação. Universidade federal de Santa Catarina, 2003.

CHANDLER, H. **Heat Treater's guide: Practices and Procedures for Irons and Steels**. ASM International. 904 p. 1994.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. Associação Brasileira de Materiais e Metalurgia. 6ª Edição. São Paulo, 1990.

COSTA, E. **Desempenho de brocas helicoidais de aço-rápido revestidas com TiN aplicando mínima quantidade de fluido de corte (MQF)**. Centro federal de educação tecnológica – CEFET – MG. 2001.

CSELLE T. **Carbide drills: ate the peak of development. Ratio drills and their applications**. 1114 p., 2002.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 338. Parallel shank twist drills, jobber series**. 1978. 8 pg.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 345. Morse taper shank twist drills**. 1978. 8pg.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 1071-3. Advanced technical ceramics – Methods of test for ceramic coatings – Part 3: Determination of adhesion and other mechanical failure modes by scratch test**. 2005, 46 pg.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 1412. Twist drills made of high-speed steel – shapes of points**. 1966, 2 pg.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 1414-1. Technical specifications for twist drills of high-speed steel – Part 1: Requirements**. 1998, 23 pg.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 1414-2. Technical delivery conditions for high-speed steel twist drills. Part 2: Inspection.** 1998, 7 pg.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 8589-2. Manufacturing processes chip removal – Part 2: Drilling, countersinking and counterboring, reaming: Classification, subdivision, terms and definitions.** 2003. 12 pg.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN SEP 1615. Microscopic and macroscopic testing of high-speed steels for their carbide distribution by means of strip mosaics.** 1975. 4 pg.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 4768. Comparison of surface roughness values.** 1974, 3 Pg.

DEMATTE, E. **Análise do desempenho e da influência das variáveis de usinagem na vida útil dos insertos de aço rápido AISI M2 Sinterizados.** Cobef 2007. UDESC, Joinville. 2007.

DINIZ, A. E.; MAERCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** 5^a ed. São Paulo: Artliber, 2008.

DONALD M. **Handbook of Physical vapor Deposition (PVD) processing.** New Jersey: Noyes Publications, 1998, 790 p.

DORMER. **Manual técnico.** São Paulo, 2008.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais.** São Paulo: Edgard Blücher, 1970, 751 p.

FORTUNATO, F. **Medição do desgaste de brochas helicoidais de aço rápido por meio do uso de um dispositivo a laser.** Dissertação: UNINOVE, São Paulo, 2012. 142 f.

HIBBS M.K.; JOHANSSON, B.O.; SUNDGREN.J.-E.HELMESSON, U. **Effects of substrate temperature and substrate material on the structure of reactively sputtered TiN films.** Thin Solid Films, v. 122, p. 115-129, 1984.

HOYLE, G. **High speed steels.** Universidade de Michigan. Butterworths, 1988. 222 f.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 513:2004. Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges – Designation of the main groups and groups of application.** 2004. 3 pg.

JESUS, E. R. B. **Ferramentas de usinagem de aço rápido AISI M2 obtido por conformação por “spray”.** Tese de doutorado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 2004.

KIECKOW, F.; KWIETNEWSKI, C.F.; TENTARDINI, E. K.; REGULY, A.; BAUMVOL, I. J. R. **XPS and ion scattering studies on compound formation and interfacial mixing in TiN/Ti nanolayers on plasma nitride tool steel.** Surface & Coatings Technology, v.201, p. 3066-3073, 2006.

KIECKOW, F. **Caracterização das superfícies e regiões interfaciais de filmes nanométricos de TiN/Ti/Aço AISI M2 nitrado a plasma.** Tese de doutorado. UFRGS. Porto Alegre, 2008.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren: drehen, fräsen, bohren.** 5 ed. Berlin: Springer, 1997.

KRAUSS, G. **Steels: heat treatment and processing principles.** ASM International. Metals Park, OH. 1990.

LEPIENSKI, C.; KURUMOTO, N.; ODO, G. **Introdução às modernas técnicas de medida de propriedades mecânicas de superfícies** (Apostila). Curitiba, 1998.

LEYLAND, A.; MATTHEWS A. **On the significance of the H/E ratio in wear control: a nanocomposite coating approach to optimized tribological behavior.** Wear, v.246, p.1-11, 2000.

MARQUES, F. **Avaliação desempenho brocas helicoidais aço rápido revestidas na usinagem de ferro fundido nodular.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

MARTINS, P. S. **Avaliação Dos Sistemas de Fixação Hidráulico e Térmico de Broca de Metal Duro em Furação do Cabeçote do Motor Fire.** Dissertação de Mestrado. PUC. Belo Horizonte, 2008.

MELLO, C. B. **Deposição de filmes finos baseada em implantação iônica por imersão em plasma com descarga liminescente e magnetron sputtering.** Tese de Doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos, 2011.

MILITARY SPECIFICATION. **MIL-S-B-10699B.** Salts, heat treating (For Metals). 1977, 22 p.

MOCELIN, F. **Avaliação da usinabilidade do ferro fundido vermicular em ensaios de furação.** Dissertação. Universidade federal de santa Catarina. 2002.

BERG, E. **Machinery's Handbook.** New York: industrial Press Inc., 2004.

OLIVEIRA, V. V. **Influência da geometria de brocas na furação de F^oF^o Vermicular.** Dissertação. Universidade Tecnológica federal do Paraná. 2008.

SAMAR F. **Técnica de teste de riscamento para investigação de adesão de filmes.** Tese doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

SANDVIK, C. **Catalogo técnico de ferramentas.** São Paulo, 2011.

SANTOS S. **Tribological characterization of PVD coatings for cutting tools.** Surface and Coatings Technology, v. 184, p. 141-148, 2004.

SANTOS, J. A. Z. **Verificação da sensibilidade dos sinais de vibração, emissão acústica e corrente do acompanhamento da evolução do desgaste de brocas.** Dissertação de Mestrado. Instituto superior Tupy. 2008

SCHROETER, R. B., STOETERAU, R. L., MÜHLE, H. B. **Estudo Comparativo de Desempenho de Brocas DIN 338**. Relatório de Pesquisa para a empresa American Tool. Produção técnica, Florianópolis, 32 f. 1999.

SERNA, M. M. **Quantificação e Identificação de Carbonetos no Aço Ferramenta AISI/SAE M2**. Tese de doutorado. Instituto de pesquisas energéticas e nucleares. São Paulo, 2008.

SILVA, H. **Influência do ciclo de furação de brocas helicoidais de HSS revestidas e nos esforços de corte quando da usinagem do ferro fundido cinzento Gh-190**. Universidade Federal de Uberlândia. 2011.

SILVA, H. A. **Influência do ciclo de furação na usinabilidade do ferro fundido cinzento GH190**. Dissertação: Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010. 314 f.

SMITH, G. T. **Cutting Tool Technology: Industrial Handbook**. Girona: Springer, 2008.

SOUSA, F. G. P. **Avaliação de Incerteza de Medição da Dureza ao Risco e da Energia de Remoção Específica de um Esclerômetro Retilíneo**. Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2004.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. Editora da UFSC, 2005.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**. Editora da UFSC, 2007.

STOETERAU, R. L. **Processos de usinagem**. 2007. <<http://pt.slideshare.net/StfanoBellote/apostila-usinagem-lm>>. Acesso em 11 Mar. 2014.

SUN, Y.; BLOICE A.; BELL, T. **Finite element analysis of plastic deformation of various TiN coatings/substrate systems under normal contact with a rigid sphere**. Thin Solid films, v. 271, p.121-131, 1995.

TASSI, R. **Revestimentos superficiais via PAPVD e Avaliação de desempenho de bicos pulverizadores de suspensões cerâmicas**. Dissertação de Mestrado. UFRGS. 2010.

TEDESCO, M.V. **Variação dimensional e microestrutural do Aço AISI 4140 em Peças Usinadas por Torneamento**. Dissertação de mestrado. UCS. Caxias do Sul, 2007.

TEIXEIRA, C. R. **Influência dos erros geométricos de afiação nas brocas helicoidais de aço-rápido na qualidade dos furos produzidos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1995.

TRENT, E.M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**. Butterworth–Heinemann, fourth ed. Woborn, MA. 2000.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. **VDI 3198. Coating (CVD, PVD) of cold forging tools**. 1992. 8 pg.

VIANA, R.; MACHADO, A. R. **Desempenho de revestimentos de brocas na usinagem de uma liga Al-Si**. 13º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2003.

WOLF, J. M. **A influência do substrato na aderência de filmes finos DLC.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2007.

YOSHIDA, S. **Comparativo em processos de tratamento térmico de moldes e ferramentas.** ABM. São Paulo, 2007.

YOUSSEF, H. A. E.; El-Hofy, H. **Machining Technology: Machine Tools And Operations.** Boca Raton: CRC Press, 2008.

ZLATANOVIC, M.; KUNOSIC A.M.; BELOSEVAC R.B. **Plasma deposition of hard coating – Duplex treatment.** Material Science Forum. V. 214, p. 179-188, 1996.