

Tema: Engenharia de Superfície

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

Cristiano Devitte¹

Resumo

O presente trabalho busca verificar a viabilidade técnica de utilização de aços com diferentes percentuais de elementos de liga em sua composição química para a fabricação de brocas DIN 338, com e sem revestimento PVD de TiN comparando com aço AISI M2. 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. No teste de furação foi utilizada um centro de usinagem vertical 3 eixos. A aderência do filme PVD foi verificada pelo teste de indentação VDI 3198. As variáveis significativas foram o material do substrato, o revestimento da ferramenta, a velocidade de corte e o avanço de corte. As variáveis de resposta analisadas foram o desgaste da ferramenta, o número de furos produzidos, a rugosidade superficial e o diâmetro dos furos. Ao final do trabalho foi possível constatar que o material Z2 ainda não pode ser utilizado como alternativa ao AISI M2 para a fabricação de brocas helicoidais de aço rápido.

Palavras-chave: Aço rápido; Furação; TiN; Broca helicoidal.

STUDY OF THE USE OF STEEL QUICK WITH MODIFIED CHEMICAL COMPOSITION FOR MANUFACTURING OF HELICAL DRILLS DIN 338

Abstract

The objective was to assess the technical feasibility of using steels with different percentages of alloying elements in its chemical composition to manufacture drills DIN 338, with and without TiN coating compared to AISI M2. The material was characterized metallurgical in accordance with standard SEP 1615 and the Snyder - Graf method. It was necessary to conduct a pre-test to define the parameters of heat treatment. The adhesion of the PVD film was verified by the VDI 3198 indentation test. The significant variables were substrate material, coating the tool, cutting speed and the cutting feed. The response variables were the wear, the number of holes and surface roughness. At the end of the work it was found the Z2 materials can't be used to the AISI M2 can be used as the AISI M2.

Keywords: High speed steel; Drilling; TiN; Helical drill.

¹ Eng. Mecânico, Engenheiro de produto, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os revestimentos PVD (Physical Vapor Deposition) são aplicados em brocas de aço rápido com espessuras de 3 μm a 8 μm em temperaturas entre 150 e 550°C. São estes revestimentos superficiais que aumentam a dureza das peças bem como a resistência ao desgaste abrasivo das ferramentas [1].

O processo de remoção de material por usinagem na indústria metal mecânica representa em torno de 15% a 20% da transformação do aço. Existe uma representatividade muito grande do processo de furação com brocas curtas, com até 2,5 vezes o diâmetro de da broca, por representarem cerca de 30% dos processos de usinagem [2].

Os aços rápidos são basicamente empregados na fabricação de ferramentas de corte. Entre as importantes características dos aços rápidos se destaca a capacidade de manter a dureza com temperaturas de operação elevada, em torno de 58HRC a 550°C [3].

Os aços rápidos AISI M2 são caracterizados por apresentarem molibdênio, cromo, vanádio, cobalto e tungstênio. A função do cromo é aumentar a resistência a corrosão e oxidação, assim como o cobalto. O vanádio tem como propriedade aumentar a tenacidade e o tungstênio confere o aumento da dureza a quente. Representaram, no período de 1950-1960, nos EUA, 70% dos aços rápidos consumidos. Atualmente, são 95% dos aços rápidos produzidos nos EUA [3].

A crescente industrialização está tornando o mercado mais competitivo e novas ligas de aço estão sendo distribuídas, algumas delas podem servir como alternativa para os aços rápidos utilizados, e este trabalho se propõe a investigar uma delas, tentando sua validação para ser utilizada como alternativa para a substituição do AISI M2.

2 PROCESSO DE FURAÇÃO

A furação com brocas se inclui no processo de fabricação com gume de geometria definida. Juntamente com o torneamento aplica-se em torno de 30% das operações de usinagem. Representa 75% do volume de material removido no processo [4]. De acordo com a norma DIN 8589, pode-se definir o processo de furação como um processo de usinagem de movimento circular. A ferramenta possui avanço em relação ao seu eixo mantendo a posição da ferramenta em relação à peça [5]. As peças obtidas por este processo normalmente são furadas em cheio ou necessitam um alargamento [6].

2.1 Brocas Helicoidais

São as ferramenta mais utilizadas na execução de furos, sendo fabricadas, quando em aço rápido, de acordo com as normas DIN 1412 e DIN 1414-1 [2]. As brocas helicoidais são projetadas para furação em cheio e para peças com pré-furos. São classificadas de acordo com o tipo de material do qual são fabricadas, forma da haste, número de canais, sentido de corte, comprimento, diâmetro e afiação da ponta [4].

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, 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 [4].

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 de corte são utilizados para a estimativa de vida de ferramentas [7]. O avanço é a grandeza do movimento de avanço medido do plano de trabalho da ferramenta e 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 [8, 9].

2.2 Revestimentos de Brocas Helicoidais

Os revestimentos superfícies têm como característica melhorar a resistência ao desgaste devido a redução do atrito na superfície de saída do cavaco, servindo de isolante químico, aumentando a vida e reduzindo esforços no processo de usinagem [10]. 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 [11]. Os filmes PVD são utilizados para melhorar as propriedades mecânicas dos materiais, no sentido de melhorar a vida útil. Podem ser depositados, basicamente, por *Sputtering* – onde átomos são ejetados mecanicamente com o objetivo de atingir íons ou átomos neutros ou por *Íon Plating*, onde os átomos são injetados sobre a superfície do substrato [12].

O revestimento de Nitreto de Titânio 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 a brocas não revestidas [4,6]. Sofre maior desgaste por abrasão e tem 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 [7]. O teste de indentação Rockwell C foi desenvolvido pela Union of German Engineers (Verein Deutscher Ingenieure, VDI). O teste aplica uma carga pré-definida com a utilização de um durômetro. Esta aplicação gera falhas na camada adjacente. Estas falhas são analisadas via microscópio óptico com aumento de 100x e comparadas com um padrão onde pode ser classificada a adesão do filme na camada pela geração de microtrincas [7].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

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

3.1 Ensaio de Adesão do Revestimento

Para o ensaio de adesão do revestimento, conforme a VDI 3198, foram retirados corpos de prova da haste das brocas, próximo ao canal da ferramenta. Após, foram realizadas os lixamentos e polimentos das faces e encaminhados para a empresa Oerlikon Balzers para a aplicação do revestimento, realizado no mesmo momento que os que os revestimentos aplicados sobre as brocas. A medição comparativa foi



realizada pelo microscópio metalográfico invertido disponível no laboratório metalúrgico da empresa, com aumento de 100x. As cargas utilizadas nos ensaios foram de 150 kgf.

3.2 Realização dos Ensaios de Furação

Os ensaios de furação foram realizados com um centro de usinagem 3 eixos com rotação máxima de 12000 RPM, velocidade de corte de até 42m/min, velocidade de avanço de até 8000mm/min, pressão do fluido de corte de 71psi e potência do eixo árvore de 18,5KW. O programa de furação foi realizado utilizando o CAM da própria máquina considerando as dimensões do material disponível.

3.3 Medição do Desgaste das Brocas

O equipamento utilizado para a aquisição das imagens para o acompanhamento do desgaste de flanco das brocas possui capacidade de visualização disponível de até 40x.

3.4 Medição da Rugosidade dos Furos

Para a coleta de dados de rugosidade foi utilizado um rugosímetro digital portátil marca Mitutoyo com verificações nos parâmetros Ra e Rz. O Cut-off selecionado para a realização das verificações de rugosidade nos blocos usinados foi de 0,8mm.

3.5 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, com precisão de 0,001mm. As medições foram realizadas para cada uma das 16 condições de teste, sendo executadas nos furos 1, 90, 180 e 270, que correspondem, respectivamente, a 25,4mm, 2286mm, 4572mm, 6858mm de comprimento usinado. As medidas foram realizadas no início, no meio e no final da profundidade de furação.

3.6 Determinação dos Parâmetros de Usinagem

Os parâmetros de usinagem utilizados para os ensaios foram a velocidade de avanço e a velocidade de corte da ferramenta. Os parâmetros foram definidos a partir da experiência de testes de furação anteriores da fabricante da ferramenta e podem ser visualizados na Tabela 1. As condições de teste podem ser observadas na Tabela 2. Foi realizado 1 teste com 2 réplicas para cada condição definida, com um total de 48 peças ensaiadas.

Tabela 1: Planejamento 2^K para a execução das amostras.

Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Plano de amostras 2 ⁴		
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 2: Condições de testes das amostras.

Ensaio	Avanço (mm/volta)	Velocidade de corte (m/min)	Revestimento	Material da ferramenta
1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1
4	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1
6	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1
8	1	1	1	-1
9	-1	-1	-1	1
10	1	-1	-1	1
11	-1	1	-1	1
12	1	1	-1	1
13	-1	-1	1	1
14	1	-1	1	1
15	-1	1	1	1
16	1	1	1	1

3.7 Composição Química das Ferramentas

A caracterização inicial foi realizada no estado recozido dos materiais. A análise metalográfica para verificação da distribuição de carbonetos seguiu a norma SEP 1615 e a composição química foi realizada por espectrometria óptica. Foi constatado um menor percentual de Tungstênio bem como de Molibdênio das amostras Z2 em comparação com o AISI M2.

3.8 Tratamento Térmico do Z2 e AISI M2

O tratamento térmico do aço Z2 necessitou um pré-teste para a verificação dos melhores parâmetros a serem utilizados para a obtenção das características mecânicas e metalúrgicas necessárias para a fabricação, entre elas o baixo nível de austenita retida, o elevado nível de martensita revenida da microestrutura e a dureza dos pinos de 63 HRC a 65 HRC. Para o AISI M2 estas características também foram avaliadas nos testes.

Para o material Z2 pode ser observado na Figura 1(a) a distribuição dos carbonetos primários, na Figura 1 (b) não se observa a presença de austenita retida na microestrutura e na Figura 1 (c) pode ser notado o elevado nível de revenimento da microestrutura martensita revenida. A dureza encontrada para esta condição ficou em 63,7HRC.

A análise metalúrgica realizada nas amostras de AISI M2 com Ø1/4" pode ser observada, na condição como recebida, na microestrutura da Figura 2(a). Na condição temperada na Figura 2 (b), sendo possível identificar, pelo método Snyder-Graff ou ASTM E-112, o tamanho de grão 14 obtido para o material, sendo considerado grão fino. Na Figura 2 (c) pode ser observada a microestrutura do material revenido. Pode ser observada a homogeneidade da microestrutura e a não incidência de austenita retida no material. A dureza obtida após o tratamento térmico ficou dentro da especificação, entre 63 HRC e 65 HRC.



Figura 1: a) Aço Z2 como recebido com 100x. b) Aço Z2 temperado com $T_{\text{aust}}=1165^{\circ}\text{C}$ e visualização de 1000x e em (c) temos a microestrutura do Aço Z2 Temperado e revenido (3 ciclos) com 1000x de aumento.

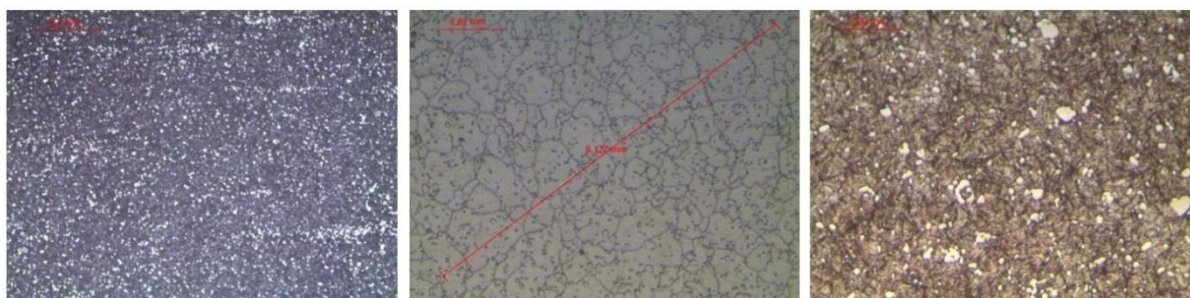


Figura 2: Aço AISI M2 verificação de distribuição de carbonetos método Snyder Graff (a), verificação do tamanho de grão temperado com 1000x de aumento (b) e microestrutura do material temperado e revenido (3x) (c).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As ferramentas foram selecionadas a partir da avaliação dimensional, com o objetivo de minimizar a influência das dimensões no desempenho da ferramenta.

4.1 Verificação Dimensional

Na verificação dimensional das brocas usinadas e utilizadas para os ensaios foram considerados os valores indicados na DIN 1414-1 e DIN 338. A verificação das medidas foi de acordo com a DIN1414-2. Foi possível observar que todas as brocas verificadas estavam em conformidade com as normas citadas.

4.2 Ensaio de Adesão dos Revestimentos – VDI 3198

Na Figura 3 (a) se observa o padrão de indentação realizado sobre o filme PVD de TiN aplicado sobre o aço Z2, onde pode ser classificado, em termos de microtrincas formadas, na classe H1/H2, considerado satisfatório para este tipo de ferramenta. Também pode ser observado o ensaio de adesão do filme de TiN sobre o substrato de AISI M2, na Figura 3 (b) onde pode ser classificado em H3, considerado satisfatório pelo nível de adesão do revestimento.

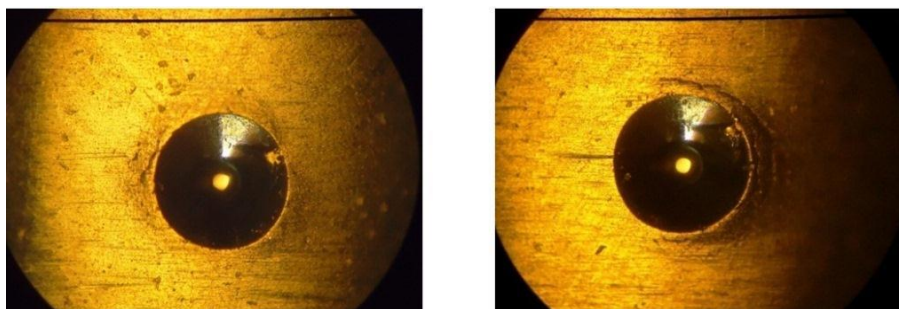


Figura 3: Ensaio de adesão de TiN sobre o substrato de Z2 (a) e substrato de AISI M2 (b).

4.3 Ensaio 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. Para isto, algumas condições ficaram fixas, como o diâmetro da ferramenta, de 6,35mm, a utilização de emulsão direta do fluido de corte com pressão de 71 psi, a furação realizada em cheio com profundidade de 25,4mm e os blocos em aço SAE 1045 com dureza de entre 170 HB e 200 HB no estado recozido.

Na Figura 4 podem ser visualizadas as diferenças para o número de furos realizados bem como 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 comparamos 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 foi atingido o $V_{b\text{médio}}$ 32% antes que na condição 13.

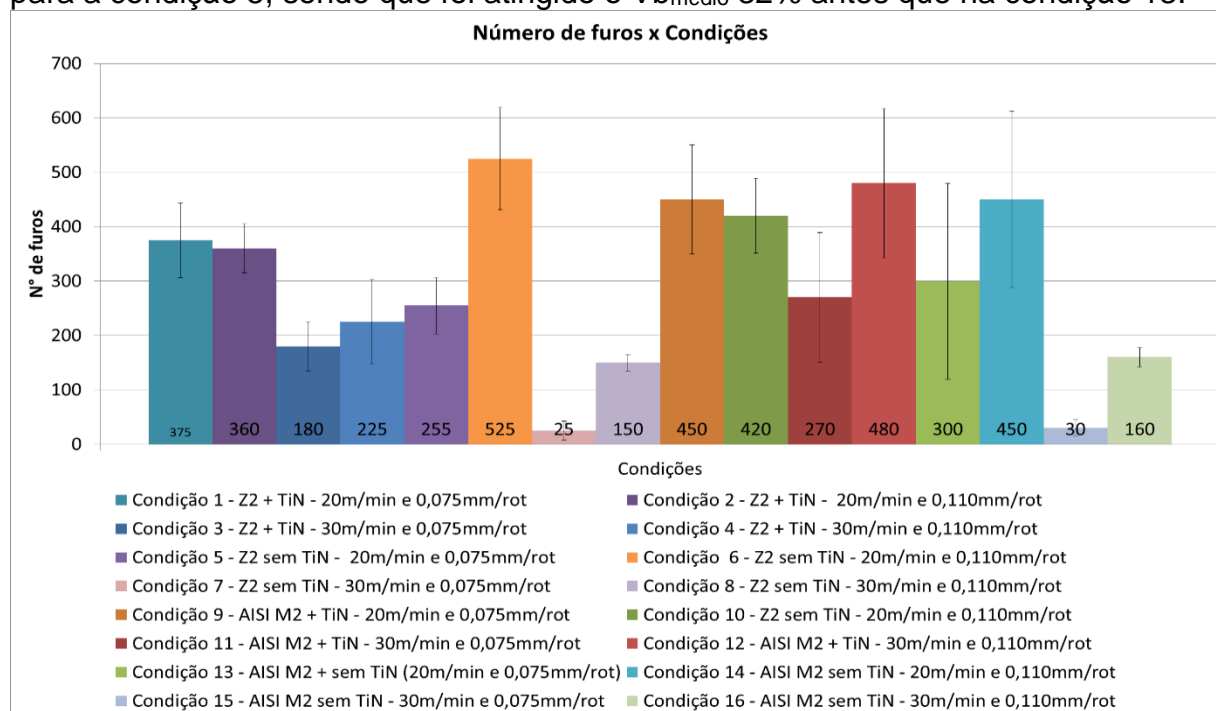


Figura 4: Número de furos realizados em função do desgaste de flanco $V_{b\text{médio}}$ para todas as condições. Condição 1, 5, 9 e 13 com $V_c=20\text{m/min}$ e $f_n=0,075\text{mm/rot}$. Condições 2, 6, 10 e 14 com $V_c=20\text{m/min}$ e $f_n=0,110\text{mm/rot}$. Condições 3, 7, 11 e 15 com $V_c=30\text{m/min}$ e $f_n=0,075\text{mm/rot}$. Condições 4, 8, 12 e 16 com $V_c=30\text{m/min}$ e $f_n=0,110\text{mm/rot}$.

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.

Entre as condições 2 (Z2 com TiN) e 6 (Z2 sem TiN) pode ser notada uma diferença significativa para o desgaste das ferramentas e também para o número de furos, 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 a 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 identificada uma diferença significativa para o desgaste de flanco das brocas.

Estas diferenças em relação ao desgaste e ao número de furos entre as peças com e sem revestimento podem estar relacionadas ao aumento do avanço de corte, geradores de maiores impactos sobre a ferramenta, aumentando a ocorrência de microlascamentos das brocas com revestimento, aumentando a progressão do desgaste nestas condições. Pode ser observado o maior número de furos realizados para a condição 6 (Z2 sem TiN), sendo 32% superior a 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.

Foi constatado uma quantidade de furos realizados para a condição 3 (Z2 com TiN) superior a 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 a condição 11.

Estas diferenças em relação ao desgaste da ferramenta e também ao número de furos realizados pode ser atribuído a menor quantidade de carbonetos resistentes à 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 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. Em relação a quantidade de furos a condição 4 (Z2 com TiN) se apresenta 50% superior a condição 8 (Z2 sem TiN). Porém, esta condição possui um erro associado de 34,6%, não tornando significativa a diferença. Para a condição 12 (AISI M2 com TiN) em relação a 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 e se justifica em função da presença do revestimento.

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 em sua microestrutura pode ter ocasionado esta maior exposição, resultando em um desgaste mais acentuado.

4.4 Qualidade dos Furos - Diâmetro de Furação

A Figura 5 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 $f_n = 0,110\text{mm/rot.}$ Na comparação da condição 4 (Z2 com TiN) em relação a 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.

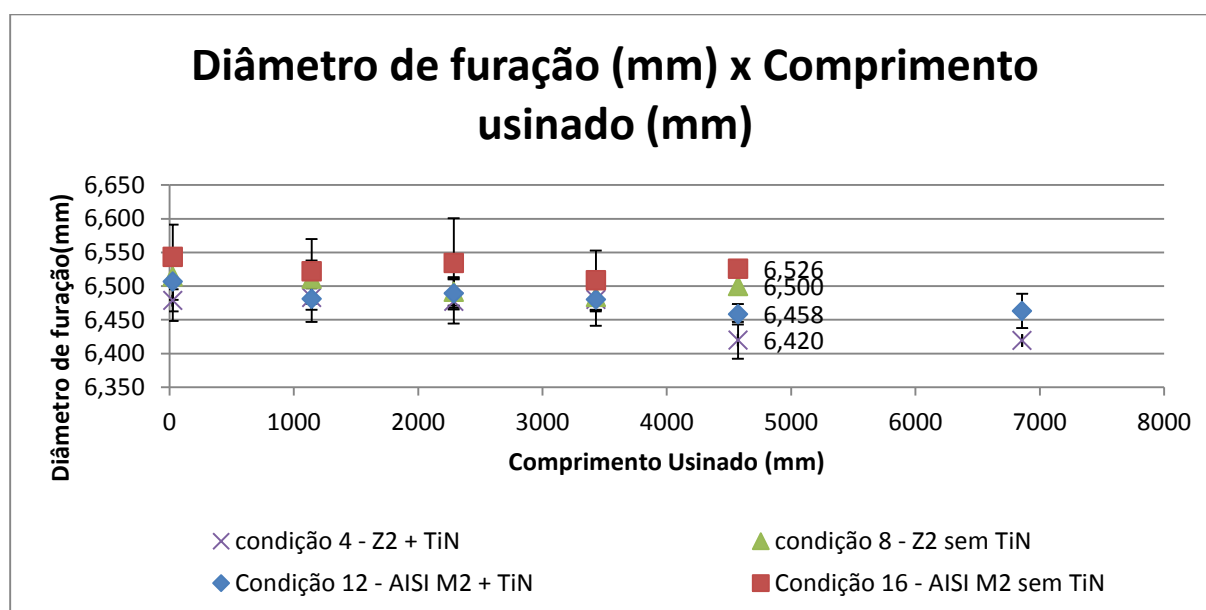


Figura 5. Diâmetro de furação em função do comprimento usinado nas condições de teste 4, 8, 12 e 16 com $V_c = 30\text{m/min}$ e $f_n = 0,110\text{mm/rot.}$

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 consequente 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.

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 das diferenças entre as arestas de corte ao longo da usinagem também pode ter interferido no diâmetro gerado pelas brocas.

Na Figura 6 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 $f_n = 0,110\text{mm/rot.}$ No comparativo entre as condições 2 (Z2 com TiN) e 6 (Z2 sem TiN) foi observado que, para o comprimento de furação 4572 mm, a condição 2 obteve um diâmetro de furação 0,27% superior em relação a condição 6, representando 0,018 mm no diâmetro de furação.

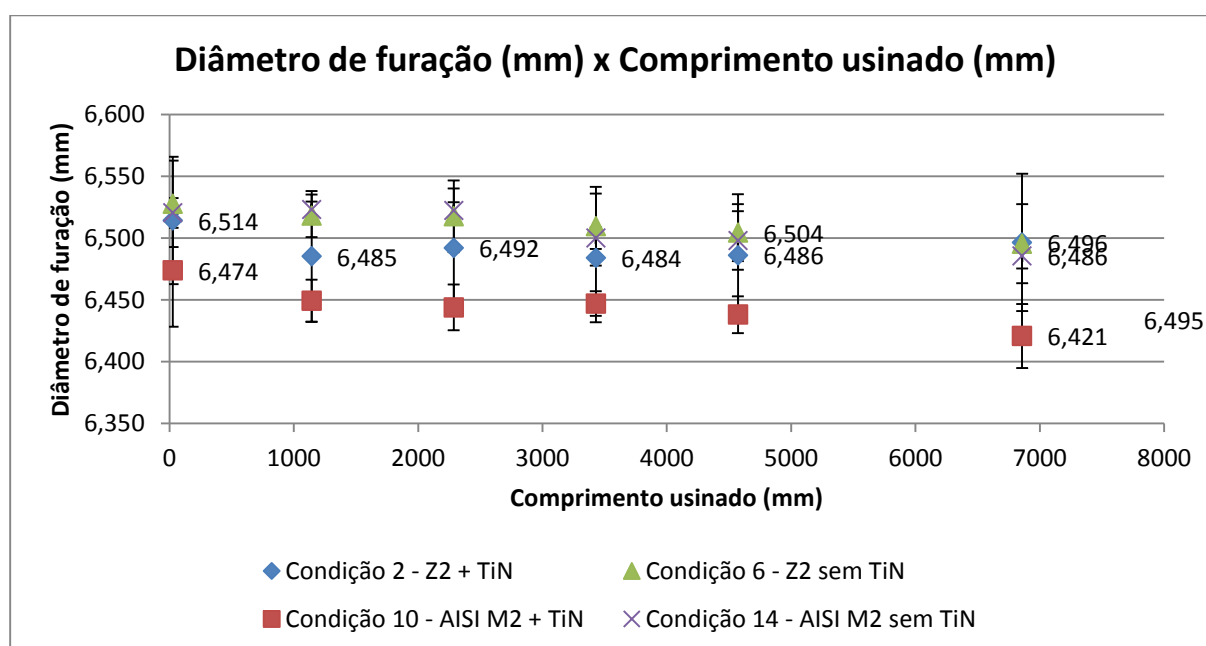


Figura 6. Diâmetro de furação em função do comprimento usinado nas condições de teste 2, 6, 10 e 14 com $V_c = 20\text{m/min}$ e $f_n = 0,110\text{mm/rot.}$

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 a 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 a condição 10, gerando um aumento de 0,04 mm para o diâmetro de furação.

Na Figura 7 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. 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% maior para a condição 5 em relação a condição 1, representando 0,067 mm. 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, 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, representando 0,016mm.

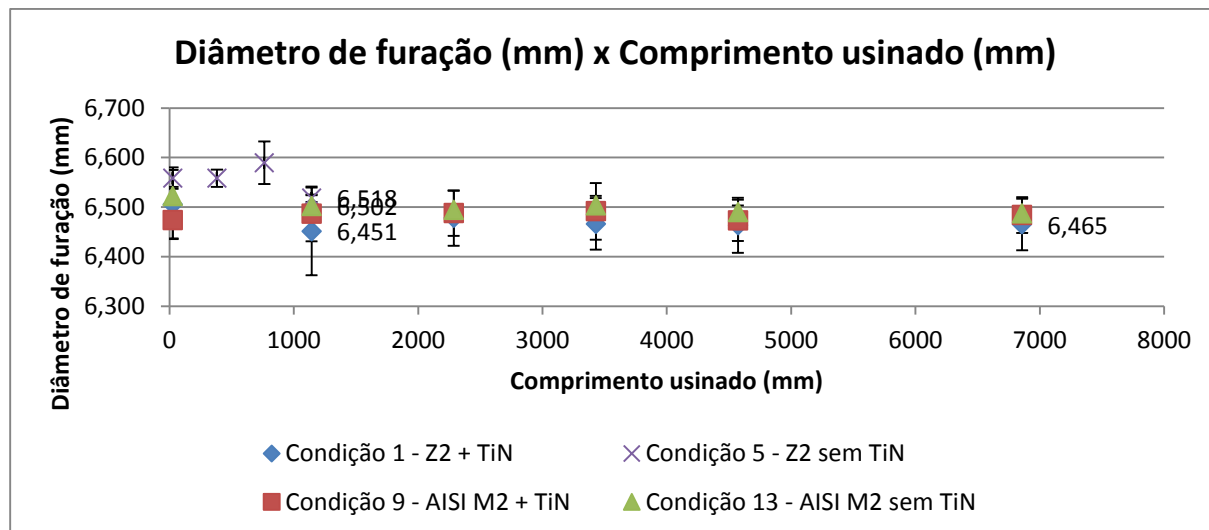


Figura 7. Diâmetro de furação em função do comprimento usinado nas condições de teste 1, 5, 9 e 13 com $V_c=20\text{m/min}$ e $f_n=0,075\text{mm/rot}$.

Na Figura 8 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 3, 7, 11 e 15.

A condição 3 (Z2 com TiN) apresentou um diâmetro de furação 0,80% inferior em relação a condição 7 (Z2 sem TiN), representando 0,05 mm nos valores obtidos para o diâmetro de furação. Já para a condição 11 (AISI M2 com TiN) foi observado um diâmetro 1,08% menor em relação a condição 15 (AISI M2 sem TiN), representando 0,07 mm.

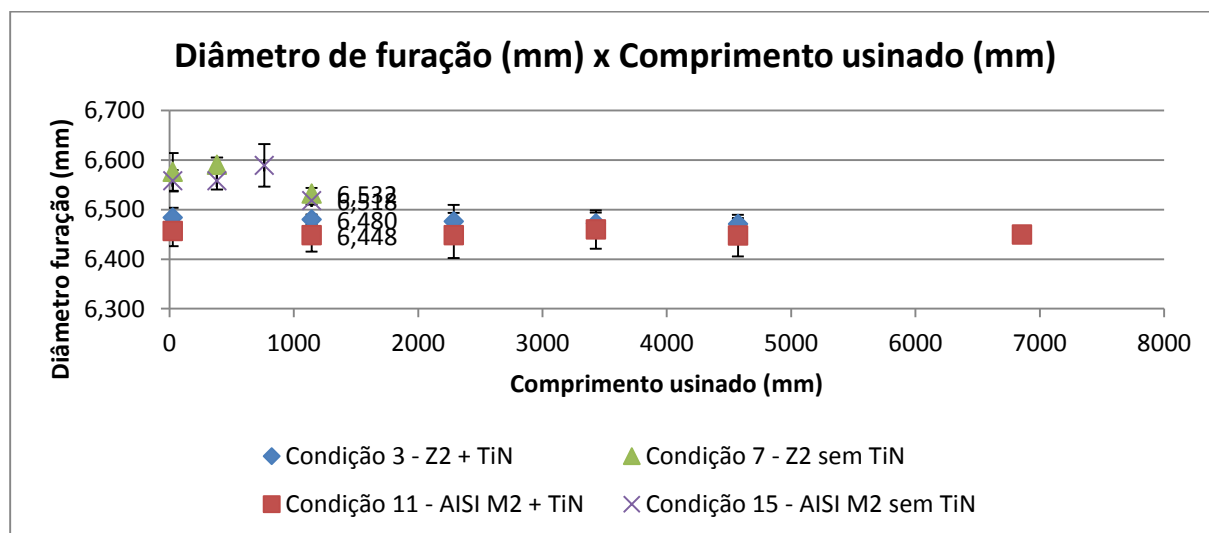


Figura 8. Diâmetro de furação em função do comprimento usinado nas condições de teste 3, 7, 11 e 15 com $V_c=30\text{m/min}$ e $f_n=0,075\text{mm/rot}$.

Para a condição 3 (Z2 com TiN) foi constatado um diâmetro 0,5% superior em relação a condição 11 (AISI M2 com TiN) representando 0,032 mm. A condição 7 (Z2 sem

TiN) ficou 0,21% superior em relação a condição 15 (AISI M2 sem TiN), representando 0,014 mm no diâmetro de furação. 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.

4.5 Qualidade dos Furos - Rugosidade de Furação

Na Figura 9 podem ser observados os valores de rugosidade para as brocas nas condições 1, 5, 9 e 13. Foram constatados valores menores de rugosidade para a condição 1 (Z2 com TiN) em relação a 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 a 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. Para a condição 5 (Z2 sem TiN) foi observada uma rugosidade 30,27% superior em relação a condição 13 (AISI M2 sem TiN).

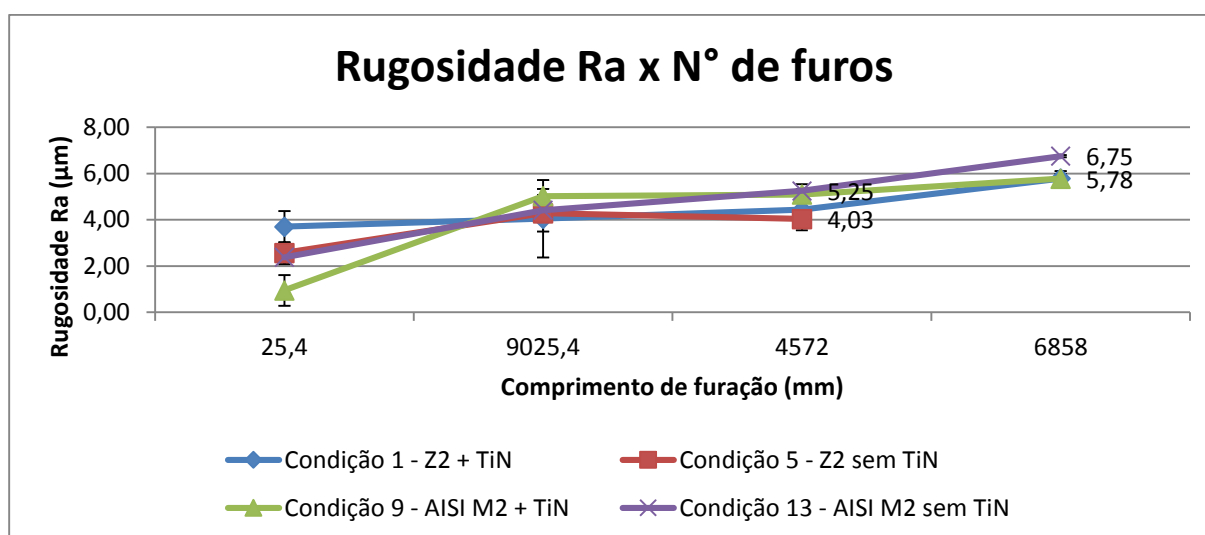


Figura 9. Rugosidade Ra para as condições de teste 1, 5, 9 e 13 com $V_c = 20\text{m/min}$ e $f_n = 0,075\text{mm/rot.}$

Na Figura 10 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 $f_n = 0,110\text{mm/rot.}$

Foram observados menores valores de rugosidade para a condição 2 (Z2 com TiN) quando comparado com a condição 6 (Z2 sem TiN) ficando em 36% para todo o comprimento usinado. Para a condição 10 (AISI M2 com TiN) a rugosidade foi 27% inferior em relação a 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 a condição 10. Quando a análise contempla a condição 6 (Z2) em relação a condição 14 (AISI M2), ambas sem TiN, a condição 14 apresentou 45,4% de rugosidade superior em relação a condição 6. No entanto, todos os valores obtidos de rugosidade podem ser

enquadrados na classe IT9 para o processo de furação, que abrange valores até 12,5 μm .

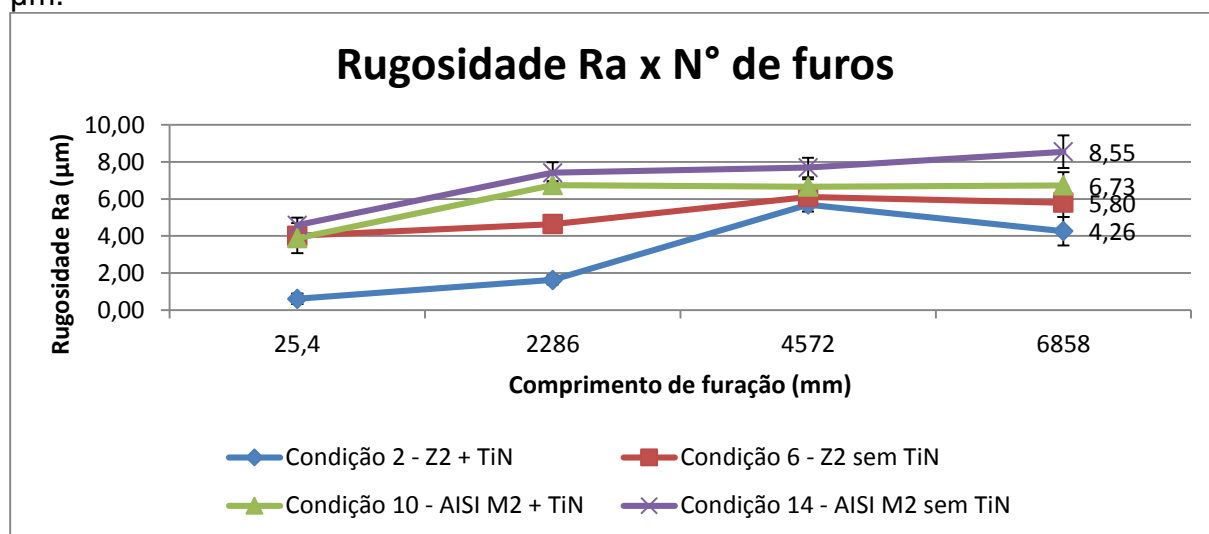


Figura 10. Rugosidade Ra para as condições de teste 2, 6, 10 e 14 com $V_c = 20\text{m/min}$ e $f_n = 0,110\text{mm/rot}$.

Na Figura 11 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. Podem ser observados valores de rugosidade maiores para as peças com revestimento de TiN se comparado com os valores obtidos nos ensaios anteriores. Para as condições 3 e 7 existem diferenças significativas para os valores de rugosidade, porém a análise fica comprometida em função do número de furos executados pela condição 7. Na condição 15 o número de furos realizados foi menor em relação a condição 11. Os valores de rugosidade obtidos estão dentro da faixa de tolerância IT9, porém muito próximo ao limite desta condição.

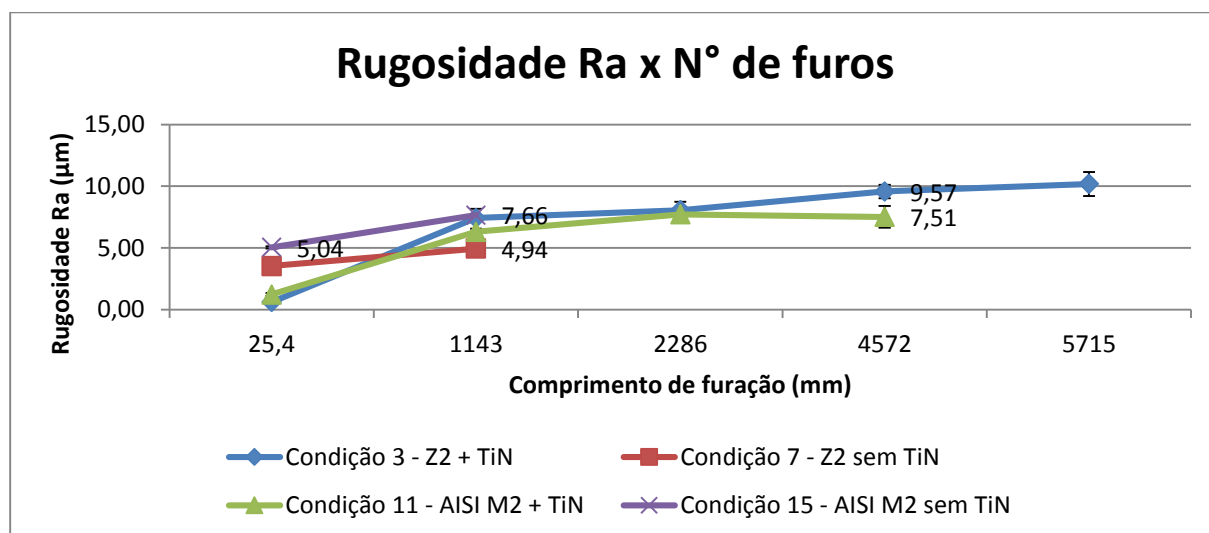


Figura 11. Rugosidade Ra para as condições de teste 3, 7, 11 e 15 com $V_c = 30\text{m/min}$ e $f_n = 0,075\text{mm/rot}$.

Na Figura 12 são observados 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.

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 a 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 entre as condições 12 (AISI M2 com TiN) e 16 (AISI M2 sem TiN) a rugosidade para a condição 12 se apresentou 64,6% menor em relação a condição 16. Entre a condição 4 (Z2 com TiN) e 12 (AISI M2 com TiN) a diferença em termos de rugosidade foi ainda superior, sendo que a condição 4 apresenta uma rugosidade 243% superior em relação a condição 12.

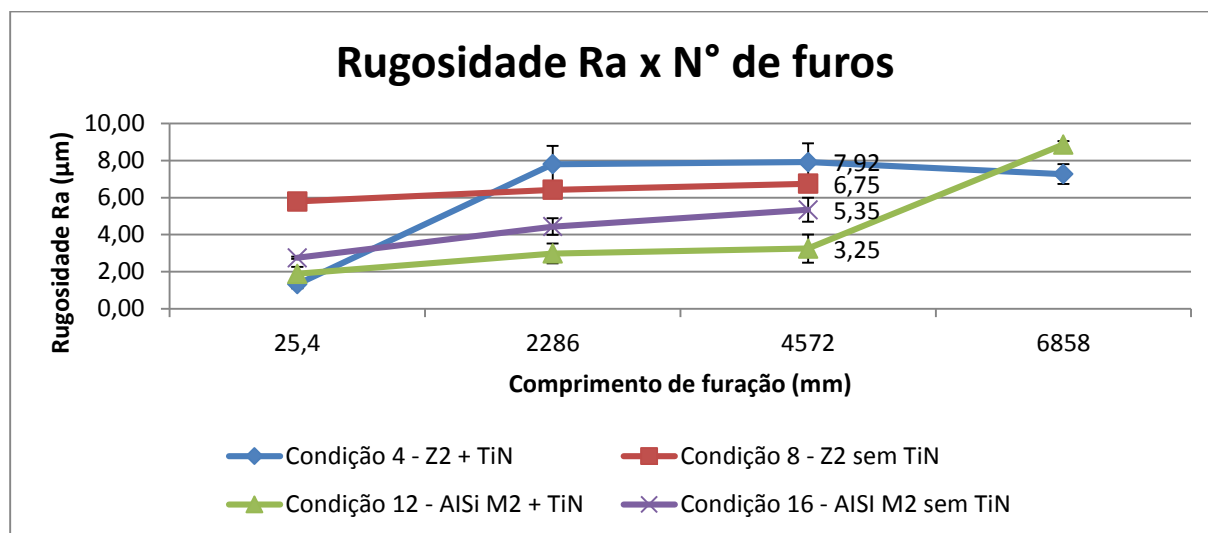


Figura 12. Rugosidade Ra para as condições de teste 4, 8, 12 e 16 com $V_c = 30 \text{ m/min}$ e $f_n = 0,110 \text{ mm/rot}$.

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 a condição 16. As variações, em termos de rugosidade, podem ser relacionadas com os parâmetros de corte utilizados nos ensaios, que foram aumentando progressivamente de acordo com o desgaste abrasivo verificado para as brocas. Porém, para todos os testes, os valores de rugosidade ficaram dentro da faixa IT 9, independentemente da condição.

5 CONCLUSÕES

- Com a velocidade de corte de $V_c = 20 \text{ m/min}$ e avanço de corte de $f_n = 0,075 \text{ mm/rot}$ e $f_n = 0,110 \text{ mm/rot}$, para brocas com revestimento e substrato de Z2, foi obtido um desempenho superior em termos de número de furos e ao desgaste da ferramenta. No entanto, com velocidade de corte de $V_c = 30 \text{ m/min}$ o AISI M2 apresentou desempenho superior, tanto com quanto sem revestimento de TiN. Portanto, o Z2, em faixas com baixa velocidade de corte, 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, devendo ser utilizado o AISI M2.
- Em relação ao diâmetro de furação, para $V_c = 30 \text{ m/min}$ e $f_n = 110 \text{ mm/rot}$, o Z2 obteve um diâmetro mais próximo ao diâmetro de furação. Porém, com a $V_c = 20 \text{ m/min}$, o AISI M2 obteve desempenho superior, seja com ou sem revestimento. Para a $V_c = 20 \text{ m/min}$, o Z2 com revestimento apresentou menor diâmetro de furação e para $V_c = 30 \text{ m/min}$ e $f_n = 0,075 \text{ mm/rot}$ o melhor desempenho observado foi para o AISI M2. Nesta análise, os materiais do

substrato, seja com ou sem revestimento, se mostraram equivalentes em relação aos diâmetros entregues durante o processo de furação. A diferenciação na utilização deve ser considerada de acordo com os critérios dimensionais de projeto ou processo adotados.

- Para a rugosidade superficial, os parâmetros de $V_c = 20\text{m/min}$ e $f_n = 0,075\text{mm/rot}$, nas brocas com AISI M2 com revestimento obtiveram os menores valores de rugosidade. Porém, com os parâmetros de $f_n = 0,110\text{mm/rot}$ e $V_c = 30\text{m/min}$, os menores valores de rugosidade observados foram do Z2, tanto com quanto sem revestimento. Com a $V_c = 30\text{m/min}$ e $f_n = 0,075\text{mm/rot}$ as brocas com AISI M2 mostraram menor rugosidade, porém, sem o revestimento, a menor rugosidade foi para o Z2. Para $V_c = 30\text{m/min}$ e $f_n = 0,110\text{mm/rot}$ o desempenho do AISI M2, tanto com revestimento quanto sem revestimento, geraram menor rugosidade de furação. Portanto, para as brocas com revestimento e trabalhando com altas velocidades de corte, as peças de AISI M2 obtiveram os menores valores de rugosidade. No entanto, em nenhuma das análises, a faixa de tolerância IT9, indicada para o processo de furação, foi ultrapassada, sendo que a rugosidade superficial não pode servir como restrição para a seleção do material do substrato.
- De forma geral, as brocas fabricadas em AISI M2 ainda possuem um desempenho superior em relação ao material Z2, seja em termos de desgaste da ferramenta quanto em quantidade de furos realizados, critério extremamente importante para a produtividade das empresas. Para o diâmetro de furação e para a rugosidade superficial, os materiais se mostraram equivalentes com os critérios de projeto adotados, não servindo como restrição para a utilização. Sendo assim, o AISI M2 continua sendo um material com desempenho superior para a fabricação de brocas, no entanto o desenvolvimento de alternativas deve continuar em constante avaliação.

Agradecimentos

Agradecer a engenharia da empresa patrocinadora do trabalho e pela disponibilidade da utilização dos recursos internos e equipamentos para a realização deste trabalho e ao Prof. Carlos Fortis, pela orientação em relação ao conteúdo do trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Tassi R. Revestimentos superficiais via PAPVD e avaliação de desempenho de bicos pulverizadores de suspensões cerâmicas [dissertação]. Porto Alegre: UFRGS; 2010
- 2 Stemmer CE. Ferramentas de corte II. Florianópolis: Editora da UFSC; 2007.
- 3 Silva, H. A. Influência do ciclo de furação na usinabilidade do ferro fundido cinzento GH190 [dissertação]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia; 2010.
- 4 Castillo W. J. G. Furação Profunda de Ferro Fundido Cinzento GG25 com Brocas de Metal-Duro com Canais Retos [dissertação]. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina; 2005.
- 5 König W, Klocke F. Fertigungsverfahren: drehen, fräsen, bohren. 5 ed. Berlin: Springer; 1997.
- 6 Diniz A. E. Marcondes F.C e Coppini N.L. Tecnologia da usinagem dos materiais. São Paulo: Artliber; 2008.
- 7 Marques F. Avaliação desempenho brocas helicoidais aço rápido revestidas na usinagem de ferro fundido nodular [dissertação]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.



- 8 Stemmer C. E. Ferramentas de corte I. Florianópolis: Editora da UFSC; 2005.
- 9 Mocelin F. Avaliação da usinabilidade do ferro fundido vermicular em ensaios de furação [dissertação]. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- 10 Bork CA. Otimização de variáveis de processo para a furação do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541 [dissertação]. Florianópolis: USFC; 1995.
- 11 Donald M. Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing. New Jersey: Noyes Publications; 1998, 790 p.
- 12 Krauss G. Steels: Heat treatment and processing principles. Materials Park: ASM International; 1989.