



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

APLICAÇÃO DO MÉTODO TAGUCHI PARA OTIMIZAÇÃO
DE PARÂMETROS NA FURAÇÃO DO AÇO ABNT 4340 COM
BROCAS DE AÇO RÁPIDO REVESTIDAS E NÃO
REVESTIDAS

OTÁVIO DOS SANTOS PEREIRA

Belo Horizonte, 14 de março de 2019

Otávio dos Santos Pereira

**APLICAÇÃO DO MÉTODO TAGUCHI PARA OTIMIZAÇÃO
DE PARÂMETROS NA FURAÇÃO DO AÇO ABNT 4340 COM
BROCAS DE AÇO RÁPIDO REVESTIDAS E NÃO
REVESTIDAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Engenharia de Manufatura e Materiais

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Araújo Câmara

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2019

P436a	<p>Pereira, Otávio dos Santos. Aplicação do método Taguchi para otimização de parâmetros na furação do aço ABNT 4340 com brocas de aço rápido revestidas e não revestidas [manuscrito] / Otávio dos Santos Pereira. – 2019. 100 f., enc.: il.</p> <p>Orientador: Marcelo Araújo Câmara.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Apêndices: f. 91-100.</p> <p>Bibliografia: f. 85-90.</p> <p>1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Nitreto de titânio - Teses. 3. Revestimentos - Teses. 4. Taguchi, Método de (Controle de qualidade) - Teses. I. Câmara, Marcelo Araújo. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621(043)</p>
-------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 - Belo Horizonte - MG

Tel.: +55 31 3409.5145

E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**"APLICAÇÃO DO MÉTODO TAGUCHI PARA OTIMIZAÇÃO DE
PARÂMETROS NA FURAÇÃO DO AÇO ABNT 4340 COM BROCAS DE
AÇO RÁPIDO REVESTIDAS E NÃO REVESTIDAS"**

OTÁVIO DOS SANTOS PEREIRA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**ENGENHARIA DE MANUFATURA E MATERIAIS**".

Dissertação aprovada no dia 14 de março de 2019.

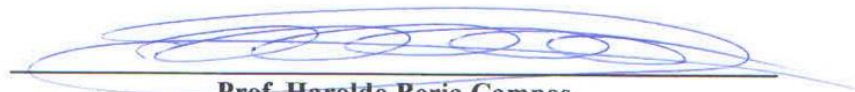
Por:



Prof. Marcelo Araújo Câmara
Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG



Prof. Alexandre Mendes Abrao
Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG



Prof. Haroldo Beria Campos
Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG

*Aos meus pais, Belmiro e Maria de Lourdes, aos meus irmãos,
Talles, Josiane e Michelle e a minha noiva Fabiula.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre abençoar as minhas escolhas e iluminar meu caminho.

A minha família, pelo apoio, incentivo e sempre ajudarem a me manter perseverante.

À Fabiula, por todo apoio, incentivo e compreensão neste período.

Ao professor Dr. Marcelo Araújo Câmara, pela valiosa orientação, confiança e paciência neste longo período.

Ao professor Dr. Paulo Sérgio Martins, pela motivação, quebra de barreiras, conselhos e principalmente pela amizade.

À Nipotec Ferramentas Industriais, na pessoa do Sr. Ismu, pela doação de material e logística.

À Oerlikon Balzers Revestimentos Metálicos, na pessoa do Vinícius e Gustavo, pela aplicação dos revestimentos nas ferramentas.

À UFMG pela disponibilização de sua estrutura e também pela oportunidade.

Aos colegas do laboratório de materiais da FCA, pela ajuda nas análises.

Aos colegas Anderson e Poliana, pela amizade e toda ajuda nesse período.

E, a todos, que de alguma forma também contribuíram para a conclusão deste trabalho.

“Se eu vi mais longe é porque estava de pé nos ombros de gigantes”

(Isaac Newton)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	12
NOMENCLATURAS	13
RESUMO	14
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivo geral.....	16
1.2 Objetivos específicos	16
2 REVISÃO	17
2.1 Operação de furação.....	17
2.1.1 Terminologia da broca helicoidal	18
2.1.2 Velocidades	19
2.2 Materiais de ferramentas	20
2.2.1 Aço rápido (HSS).....	22
2.3 Revestimentos	23
2.3.1 Deposição física de vapor - PVD	23
2.3.2 Nitreto de Titânio - TiN	24
2.3.3 Nitreto de Titânio-Alumínio - TiNAl.....	26
2.3.4 Revestimentos multicamadas	27
2.4 Esforços em operações de furação	29
2.5 Superfície usinada	33
2.6 Planejamento de experimentos.....	36
2.6.1 Método Taguchi	36
3 METODOLOGIA	46
3.1 Aço ABNT 4340	46
3.1.1 Microestrutura	47
3.2 Brocas helicoidais	48
3.3 Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV	50
3.4 Técnica de Taguchi	51
3.4.1 Medição da força de avanço F_f	53
3.4.2 Medição da rugosidade R_a	53

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1 Caracterização dos revestimentos	55
4.1.1 Espessura média das camadas	55
4.1.2 Composição elemental - EDS	57
4.2 Rugosidade (Ra).....	62
4.2.1 Razão sinal ruído (S/N) - Ra	62
4.2.2 Análise de variância ANOVA.....	68
4.2.3 Confirmação do resultado	69
4.3 Força de Avanço (Ff)	70
4.3.1 Razão sinal ruído (S/N) - Ff	71
4.3.2 Analise de variância ANOVA.....	79
5 CONCLUSÃO	81
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
ABSTRACT	84
REFERÊNCIAS	85
APÊNDICE A	91
APÊNDICE B.....	97
APÊNDICE C.....	98

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1- Movimentos de corte, de avanço e efetivo na furação.	17
FIGURA 2.2 – Elementos da parte de corte de uma broca helicoidal.	18
FIGURA 2.3 - Relação entre dureza e tenacidade para materiais de ferramentas disponíveis.	21
FIGURA 2.4 - Resistência relativa ao desgaste abrasivo em função da dureza dos metais.	21
FIGURA 2.5 - Imagem MEV do revestimento TiN: (a) 1- substrato WC-Co; 2- camada de adesão de Ti; 3- Camada de TiN; 4- superfície do revestimento; (b) seção transversal da amostra revestida.	25
FIGURA 2.6 - (a) força máxima de avanço em função do número de furos realizados e (b) torque máximo em função do número de furos realizados.	26
FIGURA 2.7 - Imagem de MEV do revestimento multicamada [Ti/TiAlN/TiAlCN] e substrato.	28
FIGURA 2.8 - Desempenho em quantidade de furos de brocas não revestidas e revestidas. M significa multicamada (TiAlN/TiAlZrN) seguido da quantidade de camadas.	29
FIGURA 2.9 – Valor da força de avanço para diferentes velocidades de corte e avanço. Para (a) brocas de canais helicoidais e (b) brocas de canais retos	30
FIGURA 2.10 – Influência do comprimento da aresta transversal na força de avanço.	31
FIGURA 2.11 - Efeitos principais dos parâmetros de entrada em relação aos valores de (a) força de avanço e (b) momento torçor.	32
FIGURA 2.12 – Rugosidade média gerada na parede dos furos.	35
FIGURA 2.13 - Razão sinal ruído (S/N)	40
FIGURA 2.14 - Desvio médio dos diâmetros	40
FIGURA 2.15 - Resultado da rugosidade superficial (Ra) com os fatores de controle: Ct - ferramenta de corte, V - velocidade de corte e f - avanço.	42
FIGURA 2.16 - Resultado da força de avanço (F_f) com os fatores de controle: Ct - ferramenta de corte, V - velocidade de corte e f - avanço	43
FIGURA 3.1 - Detalhamento para preparação dos corpos de prova.	47
FIGURA 3.2 - Micrografia do núcleo (a) e (b) com ampliação de 100x e 500x respectivamente e da superfície do aço ABNT 4340 (c) e (d) ampliação de 100x e 500x respectivamente.	48
FIGURA 3.3 - Broca 6,00mm padrão DIN 338.	48
FIGURA 3.4 - Afiação preparada na ponta das brocas.	49

FIGURA 3.5 - Brocas aço rápido ABNT M2 6,00mm sem revestimento, revestida com TiN, TiNAl e TiNAl multicamadas respectivamente da esquerda para a direita.	50
FIGURA 3.6 - Amostras embutidas e MEV Quanta 250.....	51
FIGURA 3.7 - Esquema de montagem do experimento.....	53
FIGURA 3.8 - Corpo de prova seccionado para medição da rugosidade (Ra).	54
FIGURA 3.9 - Medição da rugosidade superficial Ra.	54
FIGURA 4.1 - Imagem obtida por MEV com medidas de espessuras do revestimento TiN...	56
FIGURA 4.2 - Imagem obtida por MEV com medidas de espessuras do revestimento TiNAl.	56
FIGURA 4.3 - Imagem obtida por MEV com medidas de espessuras do revestimento TiNAl-M.....	57
FIGURA 4.4 - Presença elementar no revestimento TiN.....	58
FIGURA 4.5 - Presença elementar no revestimento de TiNAl e no substrato (aço rápido ABNT M2)	60
FIGURA 4.6 - Presença elementar no revestimento de TiNAl-M	61
FIGURA 4.7 - Média dos valores medidos de Ra.....	62
FIGURA 4.8 - Gráfico de efeitos principais para médias (Ra).....	64
FIGURA 4.9 - Gráfico de efeitos principais para razões S/N (Ra).....	65
FIGURA 4.10 - Aproximação dos valores de Ra para revestimentos TiN, TiNAl e TiNAl-M	66
FIGURA 4.11 - Perda de material da aresta transversal das brocas dos ensaios A2B2C1, A3B1C2 e A3B2C2 respectivamente.	67
FIGURA 4.12 - Perfil da curva de força de avanço (F_f) pelo tempo (s) durante a furação	70
FIGURA 4.13 - Média dos valores medidos de F_f	72
FIGURA 4.14 - Gráfico de efeitos principais para médias (F_f).....	74
FIGURA 4.15 - Gráfico de efeitos principais para razões S/N (F_f).....	74
FIGURA 4.16 - Ampliação das brocas aço rápido ABNT M2, ensaios A1B1C1, A1B2C1, A1B3C2 e A1B4C2 respectivamente.	76
FIGURA 4.17 - Ampliação das brocas revestidas com TiN, ensaios A2B1C1, A2B2C1, A2B3C2 e A2B4C2 respectivamente.	77
FIGURA 4.18 - Ampliação das brocas revestidas com TiNAl, ensaios A3B1C2, A3B2C2, A3B3C1 e A3B4C1 respectivamente.	78
FIGURA 4.19 - Ampliação das brocas revestidas com TiNAl-M ensaios A4B1C2, A4B2C2, A4B3C1 e A4B4C1 respectivamente.	79

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Composição % do aço rápido ABNT M2.....	22
TABELA 2.2 - Combinação de parâmetros de corte para furação.....	35
TABELA 2.3 - Arranjos ortogonais Método Taguchi.....	37
TABELA 2.4 - Valores para razão sinal ruído (S/N) e desvios de diâmetro.	39
TABELA 2.5 - Parâmetros de corte e seus níveis	44
TABELA 3.1 - Análise química Aço ABNT 4340	46
TABELA 3.2 - Revestimentos aplicados nas brocas de aço rápido ABNT M2.....	49
TABELA 3.3 - Parâmetros de controle e seus níveis	51
TABELA 3.4 - Arranjo ortogonal Taguchi L ₁₆ (4 x 4 x 2)	52
TABELA 4.1 - Média e desvio padrão da espessura dos revestimentos.....	55
TABELA 4.2 - Valores médios de Ra e razão sinal ruído (S/N) de cada ensaio.	63
TABELA 4.3 - Tabela de resposta de efeitos principais para médias.....	64
TABELA 4.4 - Análise de variância ANOVA para rugosidade superficial (Ra).....	68
TABELA 4.5 - Confirmação do resultado A4B3C2 Taguchi para Ra.....	69
TABELA 4.6 - Valores médios de Ff e razão sinal ruído (S/N) de cada ensaio.	72
TABELA 4.7 - Tabela de resposta de efeitos principais para médias.....	73
TABELA 4.8 - Análise de variância ANOVA para força de avanço (Ff).....	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	Instituto Americano do Ferro e do Aço (<i>American Institute for Iron and Steel</i>)
ANOVA	Análise de Variância (<i>Analysis of Variance</i>)
ASTM	American Society for Testing and Materials
CVD	Deposição química de vapor (<i>Chemical Vapor Deposition</i>)
EDS	Espectroscopia de energia dispersiva
FCA	Fiat Chrysler Automobiles
HSS	Aço rápido (<i>High Speed Steel</i>)
HV	Dureza Vickers
ISO	Organização Internacional de Padronização (<i>International Organization for Standardization</i>)
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MQL	Mínima quantidade de líquido
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PVD	Deposição física de vapor (<i>Physical Vapor Deposition</i>)
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
S/N	Sinal-ruído (<i>Signal/Noise</i>)
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
TiN	Nitreto de titânio
TiAl	Nitreto de titânio alumínio
WC-Co	Carboneto de tungstênio ao cobalto

NOMENCLATURAS

d	Diâmetro da broca	[mm]
dB	Decibel	[dB]
F_f	Força de avanço	[N]
F_{f_m}	Média de F_f	[N]
F_{f_p}	F_f previsto	[N]
f	Avanço	[mm/rev]
n	Rotação	[Rpm]
Ra	Desvio aritmético médio	[μm]
R_{a_m}	Média de Ra	[μm]
R_{a_p}	Ra previsto	[μm]
v_f	Velocidade de avanço	[mm/min]
v_c	Velocidade de corte	[m/min]

RESUMO

Neste trabalho aplicou-se a metodologia Taguchi para a identificação dos níveis dos parâmetros de entrada (revestimento, velocidade de corte e avanço) que geram o melhor resultado nos parâmetros de saída: força de avanço (F_f) e acabamento superficial (R_a), durante a furação do aço ABNT 4340. Para isso, foram realizados furos a seco em amostras preparadas deste aço, seguindo o arranjo ortogonal L_{16} sugerido pela metodologia Taguchi em um centro de usinagem vertical. As ferramentas utilizadas foram brocas helicoidais de aço rápido ABNT M2, diâmetro de 6 mm, padrão DIN 338, revestidas pela técnica PVD e não revestidas. As ferramentas (revestidas e não revestidas), a velocidade de corte (v_c) e avanço (f) foram selecionadas como parâmetros de controle. Os valores médios de rugosidade na superfície dos furos acabados foram medidos utilizando um rugosímetro. Os valores médios de força de avanço foram obtidos durante os ensaios de furação por meio de um dinamômetro piezelétrico montado no centro de usinagem. Estes dados foram analisados no software Minitab 17 configurado para a função “menor é melhor” de Taguchi. A análise de variância (ANOVA) foi empregada para determinar os fatores de controle que mais afetam o acabamento superficial (R_a) e a força de avanço (F_f). As brocas revestidas a base de TiN, TiNAl e TiNAl-M (multicamadas) foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) e as espessuras médias das camadas observadas foram 2,752, 3,545 e 3,340 μm respectivamente. Para o acabamento superficial (R_a), os revestimentos foram os fatores mais impactantes (71,9%) para a redução deste parâmetro. Apesar do revestimento TiNAl-M (comercialmente Balinit Pertura) ter sido apontado pela metodologia Taguchi como o de melhor desempenho, os revestimentos no geral obtiveram resultados próximos. A velocidade de corte (v_c) e o avanço (f), não apresentaram contribuição significativa nas condições ensaiadas (13,8% e 0,5% respectivamente). Para a força de avanço (F_f), a presença do revestimento foi tão impactante quanto o avanço (38,9% e 35,0% respectivamente) e a velocidade de corte (12,8%) não apresentou contribuição significativa. O revestimento à base de TiN foi apontado pela metodologia Taguchi como o de melhor desempenho, acompanhado da menor taxa de avanço e menor velocidade de corte para a redução da força de avanço (F_f). A confirmação dos resultados foi necessária apenas para a rugosidade superficial (R_a) que juntamente com os resultados obtidos para F_f , comprovaram a eficiência da metodologia Taguchi.

Palavras-chave: Taguchi; furação; R_a ; força de avanço; revestimento; TiN; TiNAl;

1 INTRODUÇÃO

Os revestimentos desempenham um importante papel no atual estágio de desenvolvimento das operações de usinagem, principalmente no que se refere a tecnologia de ferramentas de corte. Uma vez que o desenvolvimento de máquinas e sistemas de fixação cada vez mais robustos permitem trabalho em altíssimas velocidades, buscando entregar a maior quantidade de peças por hora, com a qualidade requerida. Maiores velocidades tendem a gerar mais calor, somados à tendência de redução na utilização de fluidos de corte. Este cenário promove o desenvolvimento de revestimentos para aplicações distintas.

No entanto, quaisquer modificações nos processos, seja em virtude da incorporação de novas tecnologias ou outras diversas condições, impactam significativamente nos resultados, principalmente se tratando de usinagem, onde a modificação de uma só característica ou parâmetro levam muitas vezes a resultados que podem ser surpreendentes. O que na indústria é muito sério, uma vez que os resultados estão diretamente relacionados aos custos.

Além da “tentativa e erro”, diversas metodologias, tabelas, normas e principalmente ferramentas estatísticas são utilizadas para obter conclusões a respeito do desempenho das operações de usinagem. Na literatura muitas pesquisas estão pautadas na otimização de parâmetros de entrada no processo miradas nas características de saída: qualidade do produto, manutenção dos equipamentos e consumo de recursos. As ferramentas estatísticas muitas vezes são robustas e geram testes conclusivos com margens de erros aceitáveis. Porém, também demandam conhecimentos específicos, paradas de máquinas, consumo excessivo de ferramentas e tempo de análise.

O método Taguchi, desenvolvido pelo engenheiro de telecomunicação Genichi Taguchi, ganhou notoriedade pela amplitude de sua aplicação. Muitos trabalhos de otimização em diversas áreas de conhecimentos utilizam da metodologia. A grande vantagem dessa metodologia está na quantidade reduzida de experimentos necessários para se chegar à conclusão do experimento.

Com suas matrizes ortogonais, ou arranjos ortogonais (AO), muitas vezes o método Taguchi sugere a realização de metade dos ensaios que seriam necessários por um método fatorial completo por exemplo. Equilibrando assim os gastos com material, tempo de análise e paradas de processo com a precisão e agilidade nos resultados. A desvantagem da metodologia Taguchi está na impossibilidade de se comparar os resultados entre os ensaios realizados, uma

vez que em cada ensaio todos os parâmetros são variados. Dessa forma, as conclusões só podem ser tomadas e confirmadas na etapa final da metodologia.

A análise de variância ANOVA é utilizada na metodologia Taguchi para a complementação dos resultados, especificamente para a estimativa do percentual de contribuição das variáveis de entrada nas variáveis respostas.

1.1 Objetivo geral

Neste trabalho teve-se como objetivo geral a aplicação da metodologia Taguchi seguido da análise de variância ANOVA para a identificação dos níveis dos parâmetros de entrada (revestimento, velocidade de corte e taxa de avanço) que geram o melhor resultado nos parâmetros de saída: força de avanço (F_f) e acabamento superficial (R_a), durante a furação do aço ABNT 4340 com brocas de aço rápido ABNT M2 revestidas com TiN, TiNAl e TiNAl-M pelo processo PVD e não revestidas.

1.2 Objetivos específicos

- Observar por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV) os revestimentos aplicados por deposição física de vapor (PVD) nas brocas de aço rápido ABNT M2, nomeadamente TiN, TiNAl e TiNAl-M, para mensurar a espessura das camadas e obter a análise química elementar por meio da técnica de espectroscopia de energia dispersiva (EDS).
- Aplicar o método Taguchi por meio do software Minitab 17 para determinar a combinação entre os níveis dos parâmetros de entrada que minimizam os ruídos sobre o acabamento superficial (R_a) dos furos realizados no aço ABNT 4340.
- Aplicar a análise de variância (ANOVA) para determinar o percentual de contribuição de cada parâmetro de entrada sobre o acabamento superficial (R_a).
- Aplicar o método Taguchi por meio do software Minitab 17 para determinar a combinação entre os níveis dos parâmetros de entrada que minimizam os ruídos sobre a força de avanço (F_f) durante a furação do aço ABNT 4340.
- Aplicar a análise de variância (ANOVA) para determinar o percentual de contribuição de cada parâmetro de entrada sobre a força de avanço (F_f).
- Executar a confirmação experimental dos resultados de Taguchi.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado em síntese a pesquisa por materiais que abordam o tema em questão neste trabalho, que dará embasamento à abordagem empregada, aos testes realizados e ao caminho para a discussão dos resultados obtidos.

2.1 Operação de furação

Furação é a operação de usinagem de furos realizada usando uma broca. A peça é fixada à mesa da máquina e a broca é presa no eixo que produz a rotação e os movimentos de avanço (ASTAKHOV, 2014).

A NBR 6162 (ABNT, 1989) define os movimentos de uma broca, na operação de furação, da seguinte forma (FIGURA 2.1):

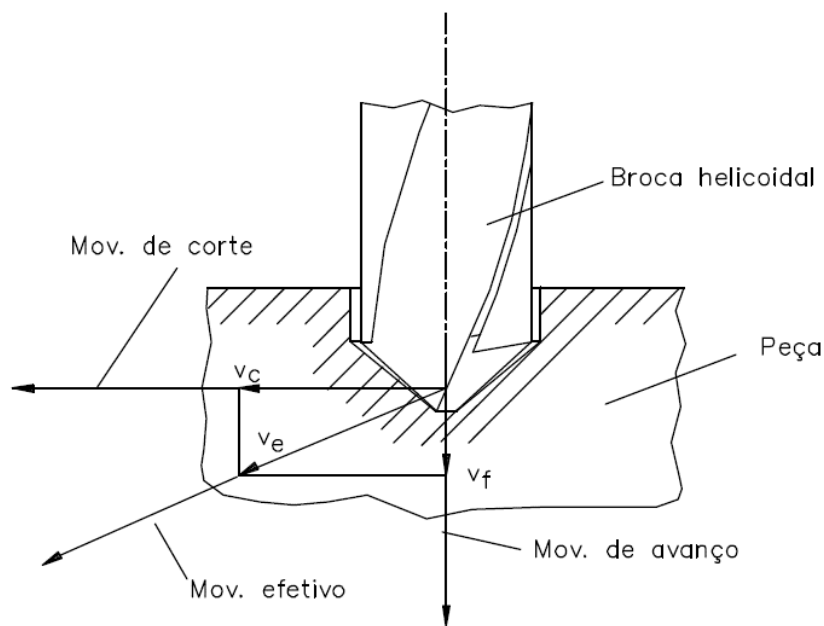


FIGURA 2.1- Movimentos de corte, de avanço e efetivo na furação.

FONTE – Adaptado de ABNT, 1989

Movimento de corte – movimento entre a peça e a ferramenta, a qual sem o movimento de avanço origina somente uma única retirada de cavaco;

Movimento de avanço – movimento entre a peça e a ferramenta a qual, juntamente com o movimento de corte, origina a retirada contínua de cavaco;

Movimento efetivo – movimento resultado dos movimentos de corte e avanço, realizados ao mesmo tempo.

2.1.1 Terminologia da broca helicoidal

Alguns termos importantes associados ao projeto da broca helicoidal são definidos pela norma NBR 6163 (ABNT, 1980) conforme a seguir e ilustrados na FIGURA 2.2.

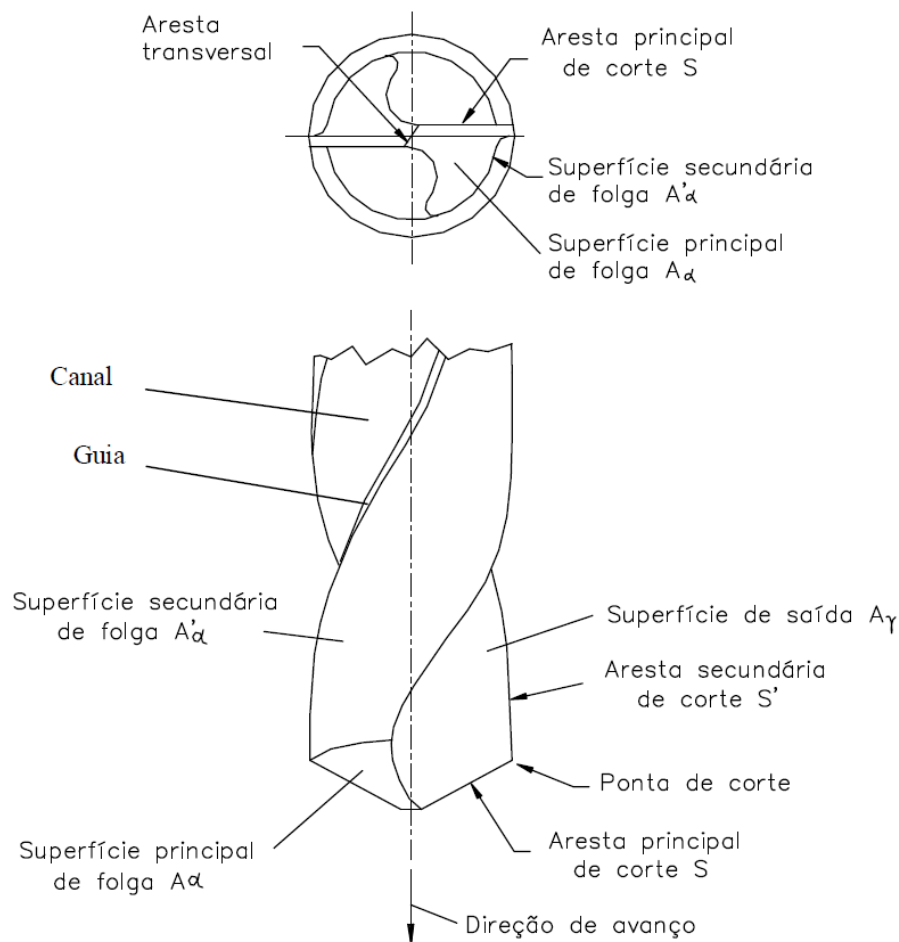


FIGURA 2.2 – Elementos da parte de corte de uma broca helicoidal.

FONTE – Adaptado de ABNT, 1980

Parte de Corte – definida como a parte ativa da ferramenta formada pelas cunhas de corte com as respectivas arestas de corte.

Cunha de Corte – é a cunha da ferramenta, formada pela interseção das superfícies de saída e de folga. Através do movimento relativo entre a peça e a ferramenta, formam-se os cavacos sobre a cunha de corte.

Superfície de Saída ($A\gamma$) – é definida como a superfície da cunha de corte, sobre a qual o cavaco é formado e sobre a qual o cavaco escoo durante sua saída da região do trabalho de usinagem.

Superfície Principal de Folga ($A\alpha$) – é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém a aresta principal de corte e que defronta com a superfície em usinagem principal.

Superfície Secundária de Folga ($A'\alpha$) – é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém a sua aresta de corte secundária principal e que defronta com superfície em usinagem secundária.

Aresta Principal de Corte (S) – é a aresta da cunha de corte formada pela interseção das superfícies de saída e de folga principal. Gera na peça a superfície principal de usinagem.

Aresta Secundária de Corte (S') – é a aresta da cunha de corte formada pela interseção das superfícies de saída e de folga secundária. Gera na peça a superfície secundária de usinagem.

Ponta de Corte – parte relativamente pequena da cunha de corte onde se encontram as arestas principal e secundária de corte. A ponta de corte pode ser a interseção das arestas ou a concordância das duas arestas através de um arredondamento, ou o encontro das duas arestas através de um chanfro.

2.1.2 Velocidades

Os parâmetros comuns de entrada na máquina ferramenta em operações de furação são velocidade de corte e velocidade de avanço. Cujo conceito pode ser entendido como proposto a seguir em Machado *et al.*, (2015):

Velocidade de corte (v_c): velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido do corte, dada pela EQ. (2.1), dependente do diâmetro da ferramenta (d) em milímetros e a o número de rotações por minuto (n).

$$v_c = \frac{\pi \times d \times n}{1000} [m/min] \quad (2.1)$$

Velocidade de avanço (v_f): velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta segundo a direção e sentido de avanço, dada pela EQ. (2.2), dependente do avanço (f) em mm/revolução e o número de rotações por minuto (n).

$$v_f = f \times n [mm/min] \quad (2.2)$$

A seleção das velocidades de corte e de avanço mais adequadas depende da operação de usinagem e dos materiais da ferramenta e da peça (MACHADO, *et al.*, 2015).

2.2 Materiais de ferramentas

Diversas são as propriedades e comportamentos que devem ser consideradas para escolha das ferramentas. Três conceitos fundamentais associados a escolha do material da ferramenta são evidenciados por Astakhov (2014):

- Dureza: definida como resistência à penetração do indentador. Está correlacionada com a resistência do material. A habilidade de manter altas durezas em elevadas temperaturas é chamada de dureza a quente.
- Tenacidade: capacidade de o material absorver energia antes da fratura. Maior a tenacidade do material da ferramenta, melhor a resistência a choques mecânicos, vibrações, desalinhamentos e outras imperfeições do sistema de usinagem.
- Resistência ao desgaste: em geral é definida como a obtenção de uma vida útil aceitável antes que as ferramentas precisem ser substituídas. Porém a resistência ao desgaste não é uma propriedade do material da ferramenta, mas sim uma resposta do sistema decorrente das condições na interface.

Apesar dos três conceitos serem independentes, é muito comum em estudos ou mesmo catálogos de fabricantes de ferramentas, uma relação da dureza com a tenacidade e com a resistência ao desgaste. Observa-se que, como ilustrado no gráfico da FIGURA 2.3, a medida em que a dureza relativa dos materiais aumenta, a tenacidade tende a ser menor e vice-versa. Trata-se de uma observação muito comum, o senso de que os materiais mais duros também possuem relativa fragilidade.

Kruschchov e Babichev (1954, apud ATKINS, 2016), realizaram testes de desgaste abrasivo com metais de diferentes durezas. O gráfico da FIGURA 2.4, relaciona a resistência ao desgaste abrasivo à dureza do metal desgastado. O coeficiente de resistência ao desgaste dos “metais puros” aumentou linearmente com a dureza do metal desgastado. O tungstênio, com dureza média próxima a 450 kg mm^{-2} , apresentou elevado coeficiente de resistência ao desgaste, aproximadamente 58, comparado por exemplo ao ferro com coeficiente aproximadamente 19 e com dureza média de 130 kg mm^{-2} .

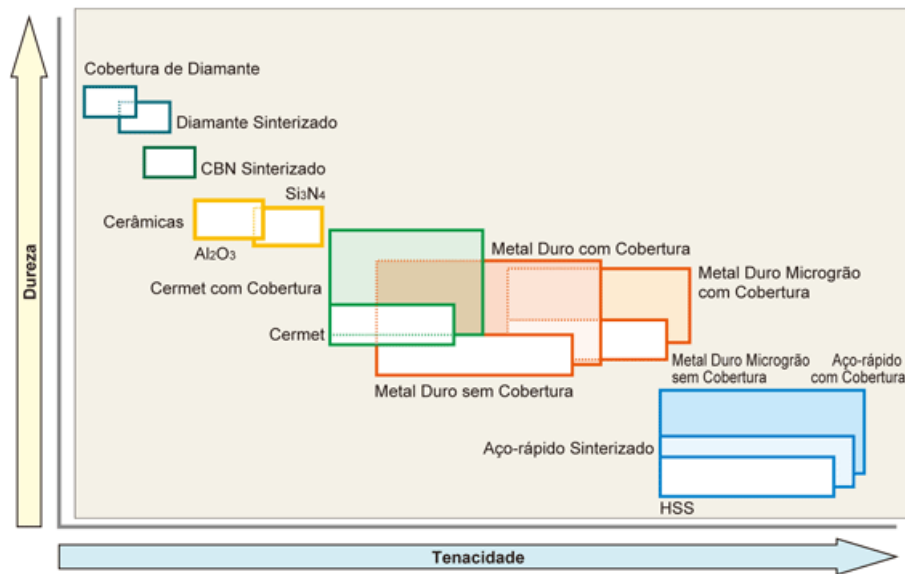


FIGURA 2.3 - Relação entre dureza e tenacidade para materiais de ferramentas disponíveis.

FONTE - Adaptado de MITSUBISHI, 2012

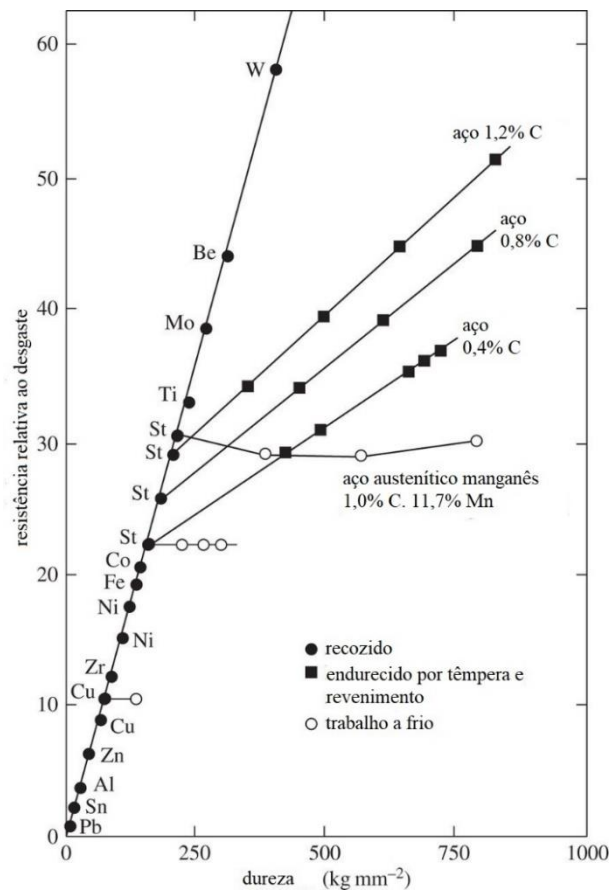


FIGURA 2.4 - Resistência relativa ao desgaste abrasivo em função da dureza dos metais.

FONTE - Adaptado de Kruschchov e Babichev, 1954, apud ATKINS, 2016, p.20160019

Porém, os autores concluem que a dureza sozinha não é um fator determinante da resistência ao desgaste abrasivo, visto que foram registrados desvios de uma relação linear para metais que foram endurecidos por tratamentos termomecânicos. Como foi no caso do aço austenítico manganês, que registrou relativa queda do coeficiente de resistência ao desgaste com o aumento da dureza de 200 kg mm⁻² até a dureza de 500 kg mm⁻².

2.2.1 Aço rápido (HSS)

Na virada do século XIX, quando Taylor e White desenvolveram o primeiro aço rápido contendo 0,67% de C, 18,91% de W, 5,57% de Cr, 0,11% de Mn e 0,29% de V, somado ao tratamento térmico apropriado, ocorreu o primeiro impacto significativo nos materiais para ferramenta. As velocidades de corte puderam ser aumentadas em cerca de 10 vezes, passando de 3 a 5 m/mim com as ferramentas de aço-carbono, para 30 a 35 m/min com as de aço rápido (MACHADO *et al.*, 2015). Justificando o nome de rápidos, ou HSS, do inglês, “*High Speed Steel*”.

O aço rápido atualmente pode ser produzido por diferentes métodos, como a fundição convencional, a metalurgia do pó e também pela conformação por *spray* (JESUS, 2004) e está disponível no mercado em variadas composições que são classificadas pela ABNT.

2.2.1.1 Aço rápido ABNT M2

O aço rápido ABNT M2, que está presente na classe dos aços rápidos ao tungstênio e molibdênio, com a composição típica aproximada à da TABELA 2.1, são amplamente utilizados como material de ferramentas para brocas, fresas, cossinetes e brochas.

TABELA 2.1 – Composição % do aço rápido ABNT M2

Designação	C	Mn	Si	Cr	V	W	Mo	Co
ABNT								
M2	0,80- 0,85	0,10- 0,40	0,10- 0,40	4,00- 4,25	1,70- 2,10	6,00- 6,50	4,75- 5,25	-

FONTE – Adaptado de MACHADO *et al.*, 2015

Vanádio, tungstênio e molibdênio são elementos formadores de carbonetos na matriz do aço rápido, balanceando características como elevada dureza, dureza a quente e resistência ao desgaste.

De acordo com Klocke (2011), os elementos de liga dos aços rápidos produzem resumidamente os seguintes efeitos:

- **Tungstênio:** formam carbonetos; aumenta a dureza a quente, retenção de dureza e resistência ao desgaste.
- **Molibdênio:** forma carbonetos; melhora o endurecimento e tenacidade, aumenta a dureza a quente, retenção de dureza e resistência ao desgaste.
- **Vanádio:** aumenta a resistência ao desgaste.
- **Cobalto:** desloca o limite de sensibilidade ao sobreaquecimento para temperaturas mais elevadas, tornando possível atingir temperaturas de dureza mais elevadas. A maioria dos carbonetos é dissolvida e a dureza a quente aumenta.
- **Cromo:** melhora a dureza, participa na formação de carbonetos.
- **Carbono:** fonte de dureza no material base. Aumenta a resistência ao desgaste por formar carbonetos.

2.3 Revestimentos

A aplicação de revestimentos tem se revelado um dos mais significantes avanços no desenvolvimento de ferramentas de corte, promovendo ganhos em termos de vida da ferramenta e desempenho de usinagem.

Segundo Astakhov (2014) a aplicação de revestimentos proporciona o aumento da dureza superficial e maior resistência ao desgaste; reduz o coeficiente de atrito facilitando o deslizamento do cavaco; reduz as forças de corte; reduz a aderência nas superfícies de contato; reduz o calor gerado devido ao deslizamento do cavaco; promove a redução de parte da energia térmica que flui para a ferramenta e melhora a qualidade da superfície das peças acabadas.

2.3.1 Deposição física de vapor - PVD

Na técnica de PVD – deposição física de vapor, o componente metálico do revestimento é produzido de um sólido, em ambiente de alto vácuo. A geração dos átomos metálicos é realizada por evaporação ou métodos de bombardeamento de íons, a temperaturas de aproximadamente 500°C (ASTAKHOV, 2014).

O processamento PVD é feito sob alto vácuo a temperaturas que variam na ordem de 150° e 500 °C. No processo PVD, o material de revestimento sólido de alta pureza (metais como titânio, cromo e alumínio) pode ser evaporado por calor ou então bombardeado com íons (sputtering). Ao mesmo tempo, é introduzido um gás reativo (por exemplo, nitrogênio ou um gás que contenha carbono), formando um composto com o vapor metálico que se deposita nas ferramentas ou nos componentes na forma de um revestimento fino e altamente aderente. Para atingir uma espessura de revestimento uniforme, as peças devem girar várias vezes dentro da câmara a uma velocidade constante. As propriedades do revestimento (como dureza, estrutura, resistência química, altas temperaturas de trabalho e aderência) podem ser desta forma controladas. Os processos PVD contemplam evaporação por arco voltaico, sputtering, galvanização iônica e sputtering incrementado (OERLIKON BALZERS, 2018).

Devido principalmente as elevadas temperaturas requeridas no processo CVD (Deposição química de vapor), as ferramentas de aço rápido deveriam ser endurecidas e temperadas depois de revestidas, tomando devidas precauções para preservar a fina camada de revestimento. No entanto este ambiente pode alterar a geometria precisa das ferramentas.

Com temperaturas na faixa de 400 - 600°C, por tanto evitando esse problema, o processo PVD é utilizado para revestir ferramentas de aço rápido (TRENT e WRIGHT, 2000).

Em 1980 o revestimento a base de TiN, foi o primeiro revestimento a ser aplicado na indústria de ferramentas de corte e 9 anos mais tarde, TiAlN, nitreto de titânio alumínio (MATTHEWS, 1985; LEYENDECKER, LEMMER, *et al.*, 1991). Embora estudos em numerosas cerâmicas avançadas para revestimentos terem sido realizados ao longo do período de 1969 até hoje, TiC, TiN, TiCN, TiAlN e Al₂O₃ continuam sendo os revestimentos de ferramenta mais frequentemente aplicados (GINTING, SKEIN, *et al.*, 2018).

2.3.2 Nitreto de Titânio - TiN

Sendo um dos primeiros revestimentos aplicados em ferramentas de corte, a elevada dureza dos revestimentos de TiN, entre 2000 a 2500 HV, garante resistência ao desgaste abrasivo e alta estabilidade química para as ferramentas de corte (HOLMBERG e MATTHEWS, 2009). Os filmes de TiN possuem uma combinação de úteis propriedades mecânicas, tribológicas e químicas, como alta dureza, resistência ao desgaste e à corrosão (SHTANSKY *et al.*, 2015).

Adoberg *et al.* (2012), realizaram deposição de uma camada cuja espessura média foi de 2,3 µm do revestimento de TiN por PVD (deposição física de vapor) em substrato de

metal duro. As imagens da FIGURA 2.5, foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), e evidenciam a disposição típica da camada de TiN sobre o substrato.

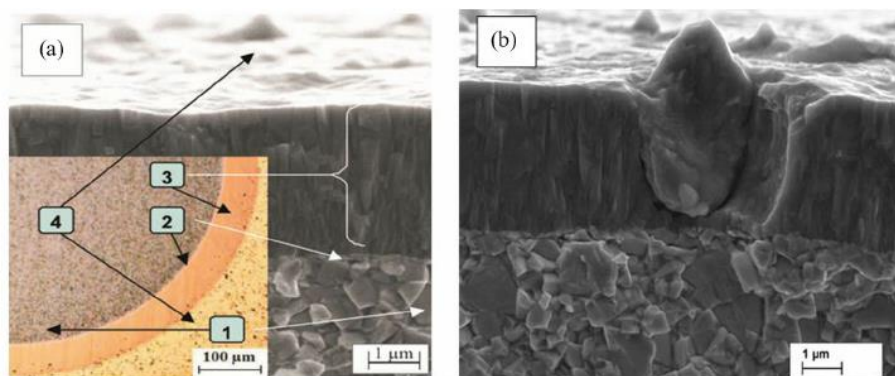


FIGURA 2.5 - Imagem MEV do revestimento TiN: (a) 1- substrato WC-Co; 2- camada de adesão de Ti; 3- Camada de TiN; 4- superfície do revestimento; (b) seção transversal da amostra revestida.

FONTE – Adaptado de ADOBERG et al., 2012, p. 187

Subramanian *et al.* (1993), compararam o desempenho de brocas de aço rápido ABNT M2 revestidas com TiN e sem revestimento em relação a quantidade furos realizados, a força de avanço e ao torque durante a furação do aço AISI 1045 (dureza de 190 HB). A dureza das brocas sem revestimentos foi de 58 HRC e das brocas revestidas com TiN foi na faixa de 1580-2300 HV. Os testes foram realizados com velocidade de corte de 22,6 m/min e avanço de 0,254 mm/rev, sendo as ferramentas utilizadas até a falha. Os gráficos da FIGURA 2.6 foram obtidos dos dados extraídos durante a medição da força de avanço e do torque com dinamômetro e aplicador de sinais. Pelos gráficos, tanto da máxima força de avanço FIGURA 2.6 (a), como máximo torque FIGURA 2.6 (b), fica evidente que o revestimento não influenciou muito neste valores, sendo que para o máximo torque algumas ferramentas sem revestimento apresentaram valores mais satisfatórios (até 50 furos). Porém as ferramentas revestidas com TiN apresentaram uma vida aproximadamente quatro vezes maior que as ferramentas não revestidas (200 furos e 50 furos respectivamente). Nos dois gráficos, fica evidente também a brusca elevação da força de avanço e torque para ambas ferramentas, revestidas com TiN e não revestidas, antes da falha.

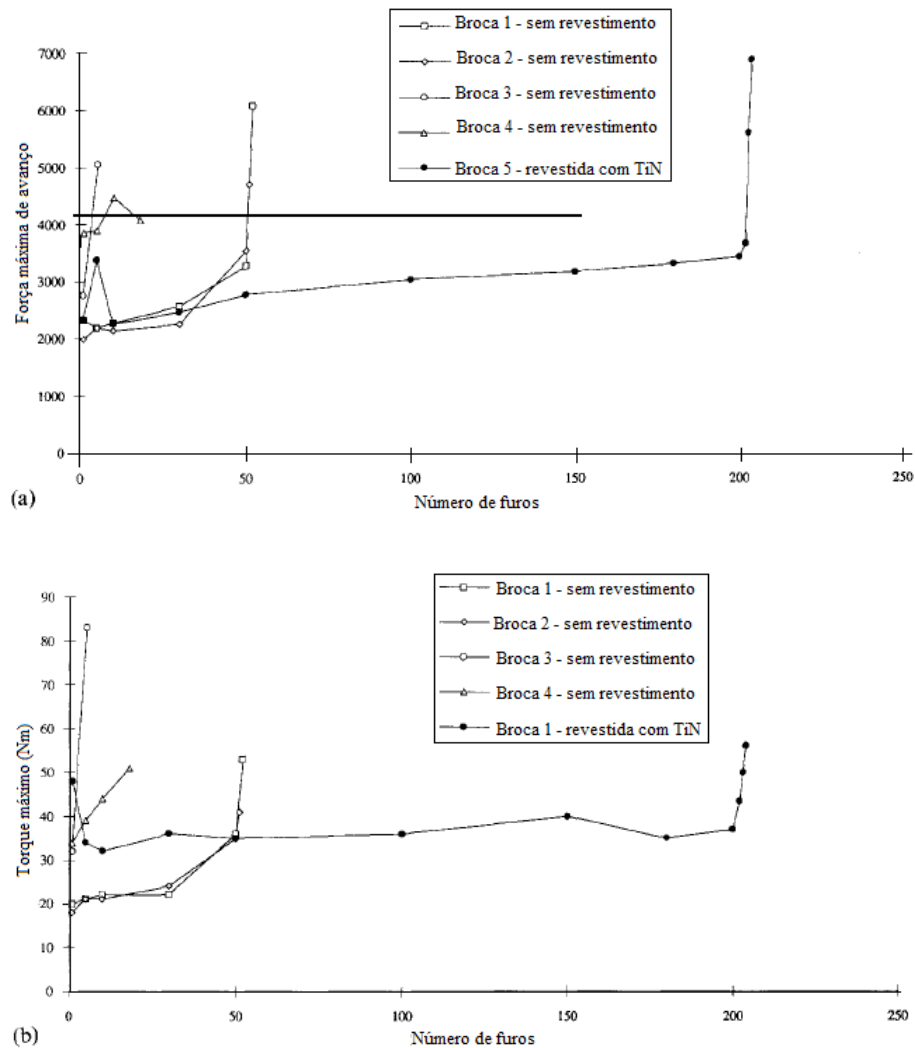


FIGURA 2.6 - (a) força máxima de avanço em função do número de furos realizados e (b) torque máximo em função do número de furos realizados.

FONTE - Adaptado de SUBRAMANIAN *et al.*, 1993, p. 644

2.3.3 Nitreto de Titânio-Alumínio - TiNAl

O TiNAl pode ser depositado sobre superfícies de seus substratos tanto por técnicas CVD como por técnicas PVD. Esses revestimentos possuem também baixa condutividade térmica e resistência ao desgaste em elevadas temperaturas. O TiNAl aumenta a dureza da superfície para aproximadamente 3400 – 3600 HV (DARSIN *et al.*, 2017).

Uma importante característica do TiNAl é a formação de uma camada protetora de óxido de alumínio durante o corte (FOX-RABINOVICH, *et al.*, 2015), gerando alta estabilidade térmica e química. Este revestimento, quando rico em alumínio, possui a capacidade de dissipar a energia de atrito no cavaco (BEAKE, SMITH, *et al.*, 2007; FOX-RABINOVICH, *et al.*,

2009). Como resultado, resta menos energia para a formação de trincas, reduzindo formação de defeitos na superfície da ferramenta (BIKSA, YAMAMOTO, *et al.*, 2010).

Meral *et al.*, (2015) estudaram a exatidão dimensional, a rugosidade superficial (Ra), desvios de circularidade e cilindridade para furos produzidos no aço AISI 1050 com ferramentas de aço rápido sem revestimento e revestidas por PVD com TiNAl. Os experimentos foram realizados a seco em variando a velocidade de corte e avanço com profundidade do furo de 17 mm. Depois de conduzidos os experimentos, as características de qualidade escolhidas foram medidas e avaliadas estatisticamente para indicar o efeito dos parâmetros nos resultados. Parâmetros como diâmetro da ferramenta, velocidade corte e taxa de avanço foram otimizados. As ferramentas revestidas com TiNAl comparadas com as não revestidas obtiveram melhor desempenho. O parâmetro mais influente na rugosidade superficial foi a o diâmetro da ferramenta; de modo geral para circularidade, precisão dimensional e cilindridade o parâmetro mais influente foi a velocidade de corte para ambas ferramentas revestidas e não revestidas, exceto a cilindridade que foi a ferramenta não revestida.

2.3.4 Revestimentos multicamadas

Revestimento para aplicações tribológicas são caracterizadas por inércia química, elevada dureza, boa adesão e resistência ao desgaste. O cumprimento com estes requisitos, no caso de revestimentos de monocamadas é difícil por causa do aumento de dureza em relação ao substrato que geralmente aumenta a fragilidade e diminui a tensão de escoamento. Uma boa solução para este problema é o uso de revestimentos multicamada (HOVSEPIAN *et al.*, 2000; WARCHOLINSKI e GILEWICZ, 2011).

Nesse caso uma possível trinca que se forma na superfície por fadiga, por exemplo, se propagará apenas até a interface da primeira camada e, posteriormente, paralela a esta. Assim quanto mais fina a camada, mais difícil é para a trinca atingir o substrato (MACHADO *et al.*, 2015).

A imagem da FIGURA 2.7 obtida do MEV por AL-Bukhaiti *et al.* (2014) mostra um revestimento de nano-camadas depositado por “sputtering”. A arquitetura desse revestimento consiste em Ti/TiAlN/TiAlCN, nessa ordem do substrato para a superfície. Onde a combinação destes revestimentos deve garantir a ferramenta uma combinação de características particulares de cada camada e da interação entre elas.

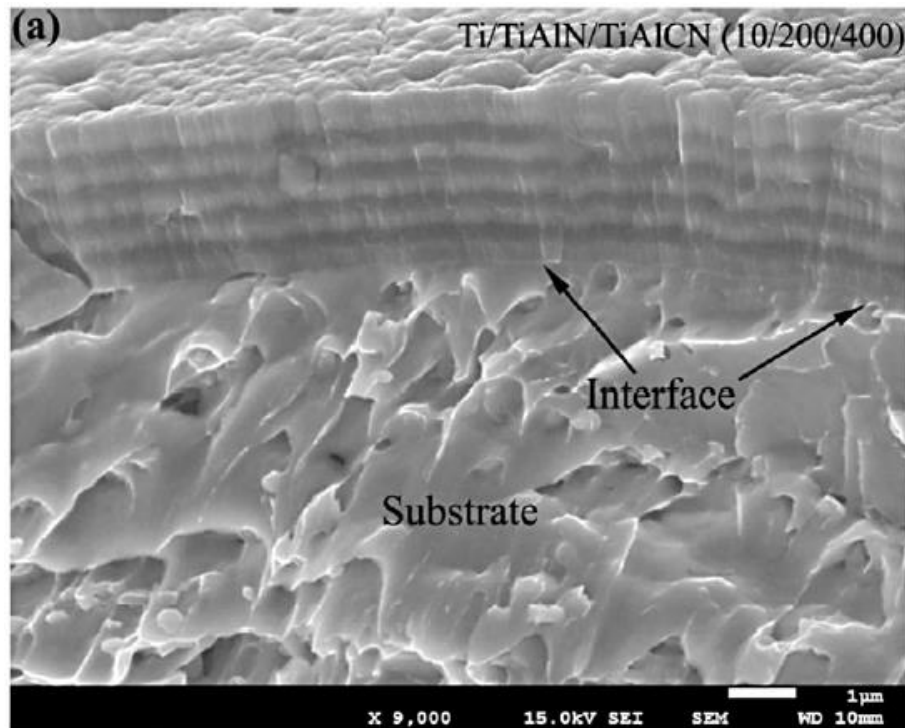


FIGURA 2.7 - Imagem de MEV do revestimento multicamada [Ti/TiAlN/TiAlCN] e substrato.

FONTE - Adaptado de AL-BUKHAITI *et al.*, 2014, p. 3

Braic *et al.* (2010) realizaram testes de furação a seco com brocas de aço rápido ABNT M2 revestidas com única e multicamadas de TiN, TiAlN e TiAlZrN, em placas de aço carbono (dureza média de 245 HB). Os testes revelaram que os revestimentos multicamadas de TiAlN/TiAlZrN exibiram desempenho superior comparado com revestimentos simples (TiN, TiAlN), em quantidade de furos produzidos, conforme gráfico da FIGURA 2.8.

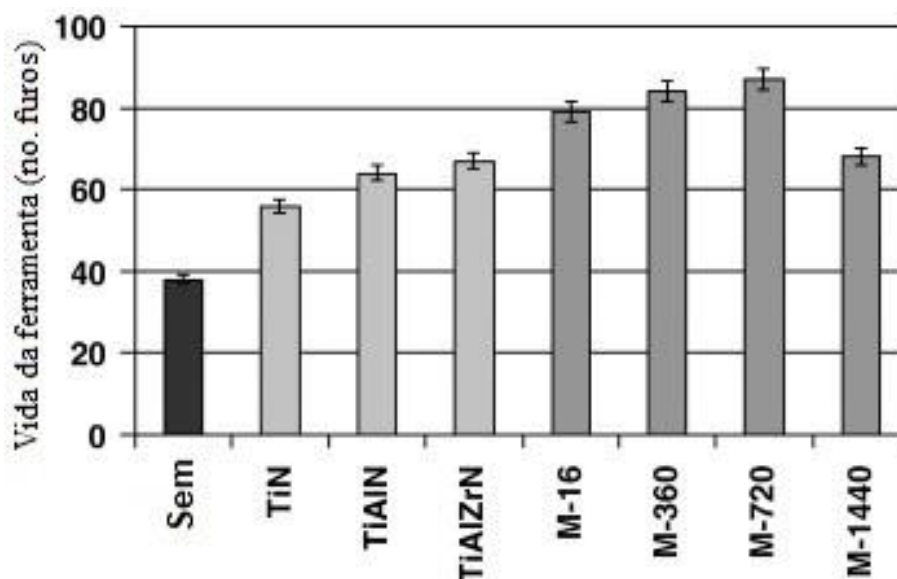


FIGURA 2.8 - Desempenho em quantidade de furos de brocas não revestidas e revestidas. M significa multicamada (TiAlN/TiAlZrN) seguido da quantidade de camadas.

FONTE - Adaptado de BRAIC, V. *et al.*, 2010, p. 1927

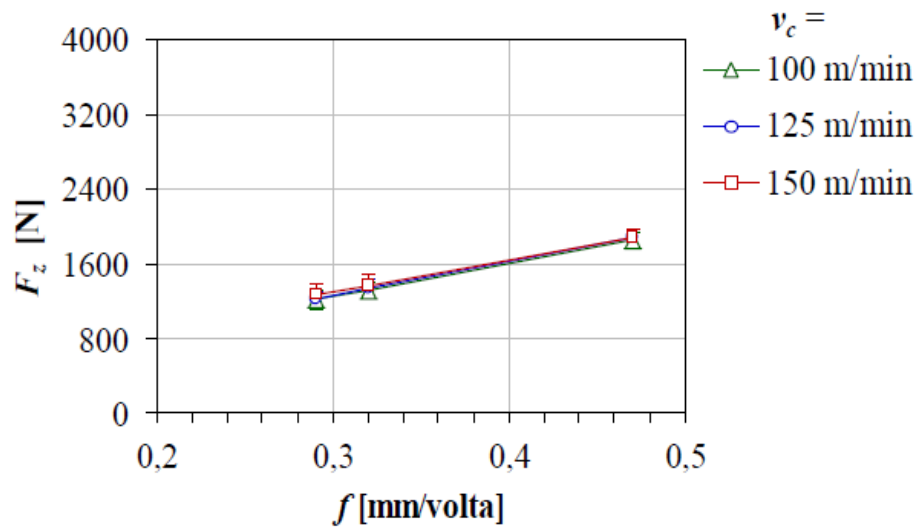
2.4 Esforços em operações de furação

As medições e estimativas dos esforços presentes nas operações de usinagem são de grande importância, não somente porque a potência requerida para executar o corte pode ser estimada, mas por fornecerem também informações para avaliação e desenvolvimento de máquinas-ferramentas (MACHADO, *et al.*, 2015).

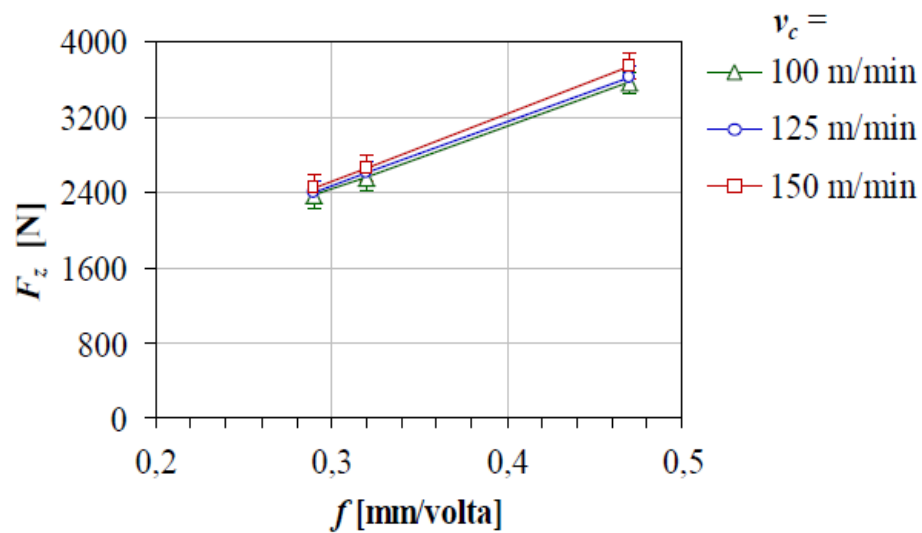
O sistema de forças em operações de furação pode ser representado pela força axial e pelo torque. Estes oscilam em amplitudes bastante amplas, dependendo do tipo de material do corpo de prova, seu estado metalúrgico e propriedades mecânicas, geometria e material da ferramenta, condições de usinagem entre outras particularidades do processo de usinagem (ASTAKHOV, 2014).

Entre os vários princípios possíveis para um dinamômetro de medição de forças de usinagem, os extensômetros e os cristais piezoelétricos são os mais comumente utilizados (MACHADO, *et al.*, 2015).

Souza, *et al.* (2014) avaliaram para diferentes valores de velocidade de corte e avanço, a força de avanço alcançada por dois tipos de brocas (helicoidais – TD1 e canais retos – SFD1) de metal duro durante a furação do ferro fundido cinzento nodular DIN GGG 50 (dureza média de 230 HB), conforme gráficos da FIGURA 2.9.



(a) Canais Helicoidais



(b) Canais Retos

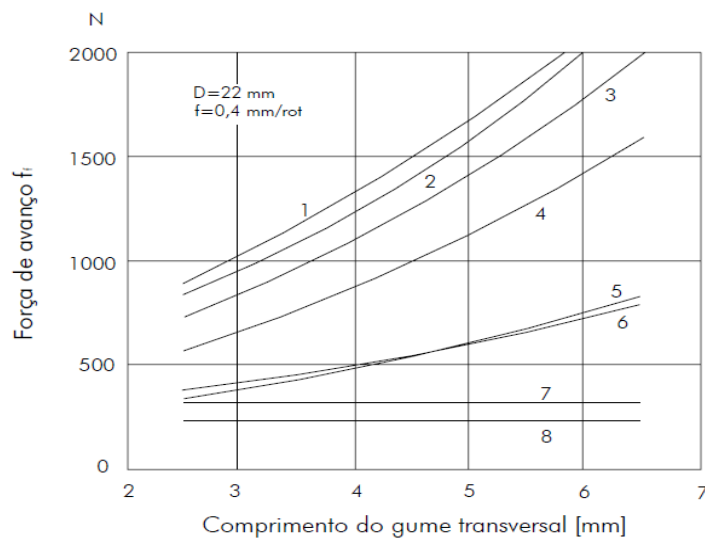
FIGURA 2.9 – Valor da força de avanço para diferentes velocidades de corte e avanço. Para (a) brocas de canais helicoidais e (b) brocas de canais retos

FONTE – Adaptado de SOUZA *et al.*, 2014, p. 7.

Tanto para as brocas de canais helicoidais como para as brocas de canais retos percebe-se pequena sensibilidade com as três velocidades de corte, 100, 125 e 150 m/min, utilizadas. Por outro lado, a tendência de aumento da força de avanço (F_z) com aumento do avanço por volta (f) é evidente em ambas e mais acentuado para a broca de canais retos. Devido principalmente ao fato de que quanto maior o avanço (f), maior a porção de material a ser

retirada na forma de cavaco por volta da ferramenta, o que eleva consideravelmente a força de avanço.

Pode ser observado no gráfico da FIGURA 2.10 a influência, também, do comprimento da aresta transversal de corte na força de avanço, dependendo do material usinado. Nota-se que, exceto ligas leves e o latão que apresentam comportamento aparentemente constante na faixa analisada, demais materiais demonstram grande sensibilidade com o comprimento da aresta transversal de corte.



1, aço ferramenta; 2, aço HB 196; 3, aço HB 156; 4, aço para autômatos; 5, ferro fundido maleável; 6, ferro fundido cinzento; 7, ligas leves; 8, latão.

FIGURA 2.10 – Influência do comprimento da aresta transversal na força de avanço.

FONTE – Adaptado de MICHELETTI, 1980 apud CASTILLO, 2005, p. 64.

A força de avanço (F_f) é ocasionada pela resistência ao corte do material (penetração da ferramenta) no sentido do avanço. A resistência ao corte por sua vez, é ocasionada pela ineficiência de corte da ferramenta e/ou pela resistência do material da peça. Na região da aresta transversal de corte ocorre o efeito conjunto de corte e deformação plástica do material da peça durante a furação (Souza *et al*, 2014). Dessa forma, o maior comprimento desta aresta, aumenta a resistência ao corte. Esse efeito, no entanto, não é predominante em ligas menos resistentes, como pode ser observado na FIGURA 2.4.

Carvalho *et al.* (2017) investigaram os esforços de corte (força de avanço e momento torçor) gerados na furação do aço inoxidável AISI 304, tomando como parâmetros de controle a geometria das brocas, a rotação, o avanço e a aplicação de fluido lubri-refrigerante,

ambos em dois níveis. As brocas de aço rápido com as geometrias a seguir e diâmetro 8mm foram utilizadas:

- Broca 1 (Irwin): ângulo de ponta 118°, ângulo de hélice 28° e afiação padrão;
- Broca 2 (Dormer): ângulo de ponta 135°, ângulo de hélice 40° e afiação cruzada;

Os parâmetros empregados foram variados em dois níveis: rotação de 358 e 557 rpm; avanço de 0,08 e 0,16 mm/volta; fluido refrigerante em abundância e em mínima quantidade (MQL). Resultando num experimento fatorial com 16 combinações. Sendo utilizado um dinamômetro piezoelétrico para a medição da força de avanço (F_f) e do momento torçor (M_t).

Os autores relataram que, de modo geral, houve aumento na magnitude tanto de F_f quanto de M_t com o incremento do avanço (f), pois há um crescimento da área da seção transversal de corte na mesma proporção. O resultado da análise de variância ANOVA da FIGURA 2.11 ilustra essa observação visto que a curva de significância do avanço aparece bastante inclinada.

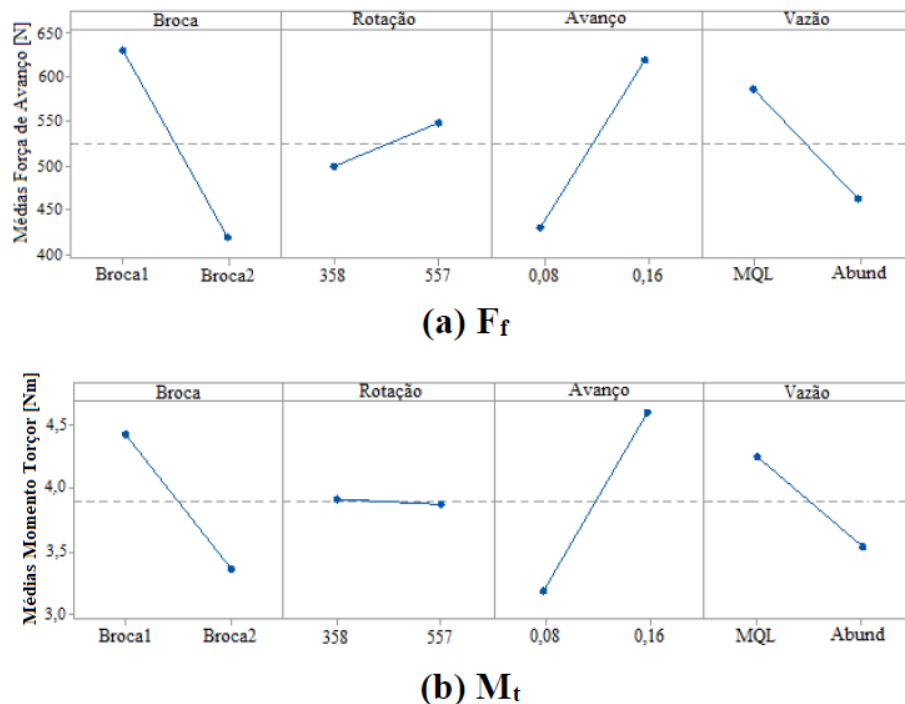


FIGURA 2.11 - Efeitos principais dos parâmetros de entrada em relação aos valores de (a) força de avanço e (b) momento torçor.

FONTE - Adaptado de CARVALHO et al., 2017, p. 5

Analogamente, a observação da FIGURA 2.11, sugere que a faixa de rotação utilizada não foi suficiente para exercer significativa influência nos resultados de força de avanço e menos ainda no momento torçor; a broca 2 gerou menores esforços que a broca 1, atribuindo que,

provavelmente devido ao menor ângulo de ponta que aumenta a espessura do cavaco facilitando sua quebra, ao diminuir sua ductilidade. Para o fluido lubri-refrigerante notou-se que tanto F_f quanto M_t , aumentaram com o uso do MQL, que segundo os autores, diferentemente da lubrificação em abundância, não forneceu uma lubrificação adequada nas zonas de corte, não auxiliou na quebra e retirada do cavaco e não diminuiu o atrito das guias da broca com a parede dos furos.

Kyratsis, *et al.*, (2018) estudaram os efeitos da velocidade corte, avanço e diâmetro da ferramenta na força de avanço e no torque durante a operação de furação do alumínio (Al7075). As ferramentas utilizadas foram brocas de metal duro com diâmetros de 8, 10 e 12 mm. A velocidade de corte foi impostada em três níveis, 50, 100 e 150 m/min e avanços de 0,15, 0,2 e 0,25 mm/rev. A análise de variância (ANOVA) foi aplicada para examinar a significância dos parâmetros nos resultados do modelo. Os autores encontraram que o diâmetro da ferramenta e o avanço apresentaram alta significância nos resultados, enquanto que a velocidade de corte não interferiu significativamente nos valores de força de avanço e torque para os experimentos realizados.

Ankalagi, *et al.*, (2017) verificaram a redução da força de avanço com o aumento da velocidade de corte durante a furação do aço SA182 com brocas de aço rápido. Foi utilizado o arranjo ortogonal de Taguchi e análise de variância (ANOVA) sobre os parâmetros de controle que foram velocidade de corte em três níveis (16, 24 e 32 m/min), avanço em três níveis (50, 75 e 100 mm/min) e ângulo de ponta da ferramenta (118°, 126° e 134°). Os autores constatam que com elevadas velocidades de corte, ocorre fragilização térmica, o que facilita a remoção dos cavacos, contribuindo assim para a redução na força de avanço.

2.5 Superfície usinada

A condição final de uma superfície usinada é resultado de um processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e, às vezes, reações químicas (MACHADO *et al.*, 2015). Por tanto, uma mesma operação de usinagem deve apresentar diferentes resultados quanto ao acabamento superficial, com a mínima modificação em parâmetros (velocidade de corte, avanço, material da peça, revestimento, geometria da ferramenta, etc.) que impactam nos fenômenos acima citados.

Segundo a norma NBR ISO 4287 (ABNT, 2002), destacam-se os seguintes parâmetros para avaliação do acabamento de superfícies:

- **desvio aritmético médio (R_a):** é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem.
- **desvio médio quadrático (R_q):** a raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem.
- **altura máxima do perfil (R_z):** é a soma da altura máxima dos picos do perfil e da maior das profundidades dos vales do perfil no comprimento de amostragem.
- **altura total do perfil (R_t):** é a soma das maiores alturas de pico do perfil e das maiores profundidades dos vales do perfil no comprimento de avaliação.

Sharma *et al.*, (2015), otimizaram os resultados de rugosidade R_a nas superfícies de furos realizados em aço inoxidável AISI 304 com brocas helicoidais de aço rápido. Foi utilizada a metodologia Taguchi, cujos parâmetros de controle foram velocidade de corte, avanço e ângulo de ponta da broca, ambos em dois níveis, superior e inferior. O objetivo foi determinar os níveis dos parâmetros de entrada para os quais resultasse nos menores valores de rugosidade. Nos resultados de Sharma *et al.*, (2018), destaca-se a elevação da rugosidade (R_a) com a mínima alteração no avanço. E também a redução desse parâmetro com o aumento da velocidade de corte. Já o ângulo de ponta da ferramenta, nas condições testadas não apresentou influência significativa nos resultados.

Com mais de um tipo de afiação para brocas helicoidais (TDx) e brocas de canais retos (SFDx), Souza *et al.* (2014), avaliaram a rugosidade superficial dos furos produzidos no ferro fundido, utilizando o parâmetro R_a como característica de controle. Pelo gráfico da figura, verifica-se a tendência à diminuição no valor de R_a com a diminuição do avanço (f) e com o aumento da velocidade de corte. Na TABELA 2.2 estão os parâmetros utilizados pelos autores para os realização dos furos de 1 a 9.

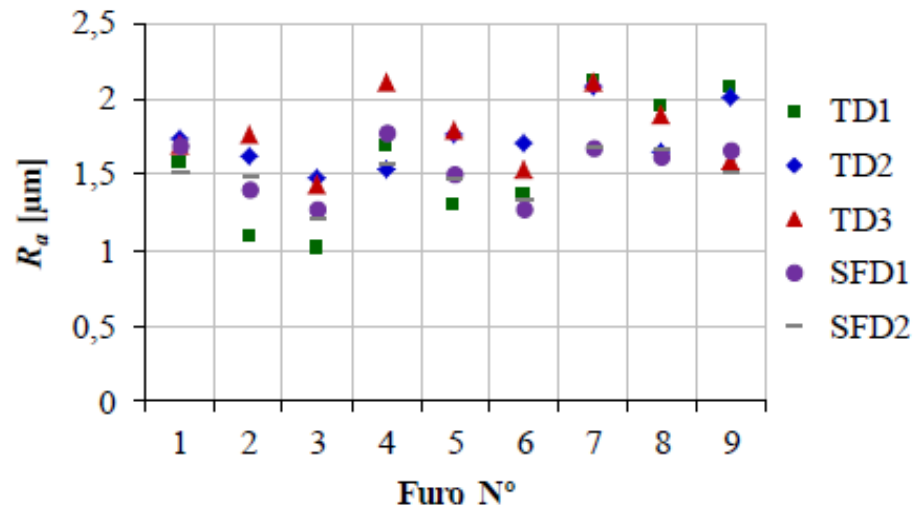


FIGURA 2.12 – Rugosidade média gerada na parede dos furos.

FONTE – Adaptado de SOUZA *et al.*, 2014, p. 9

TABELA 2.2 - Combinação de parâmetros de corte para furação

Furo N°	v_c (m/min)	n (rpm)	f (mm/volta)
1	100	2653	0,29
2	125	3316	0,29
3	150	3979	0,29
4	100	2653	0,32
5	125	3316	0,32
6	150	3979	0,32
7	100	2653	0,47
8	125	3316	0,47
9	150	3979	0,47

FONTE - Adaptado de SOUZA *et al.*, 2014, p. 5

A velocidade de corte de foi apontada por Ramesh *et al.*, (2015) como o fator mais significante para redução da rugosidade na superfície de furos realizados no aço EN31 usando brocas de aço rápido revestidas e não revestidas. O estudo objetivou a otimização de parâmetros de processo com foco na redução da rugosidade (R_a), cujos experimentos foram conduzidos utilizando arranjo ortogonal (AO) L_{27} de Taguchi. Çelik (2014) também investigou os efeitos de parâmetros de processo na furação da liga 6Al-4V quanto a rugosidade (R_a). Os

experimentos foram realizados para diferentes combinações de velocidade de corte (12,5, 18,75 e 25 m/min) e avanços (0,05, 0,1 e 0,15 mm/rev) no centro de usinagem vertical sem fluido de corte. Brocas de aço rápido de diferentes ângulos de ponta foram utilizadas (90°, 118°, 130° e 140°). Nas condições ensaiadas foi evidenciado pelos autores a redução da rugosidade com o aumento da velocidade de corte. Para maiores avanços e ângulos de ponta das brocas, foi observado o contrário, aumento da rugosidade superficial.

No trabalho de Kumar *et al.*, (2014), foi empregado também o método de Taguchi para a otimização da rugosidade na operação de furação de aço baixa liga. Os experimentos foram conduzidos seguindo arranjo ortogonal (AO) L₂₇. Os autores concluem que para as condições do experimento, a combinação de menores velocidades de corte com menores avanços e com médio ângulo de ponta da ferramenta, resultaram na redução da rugosidade na superfície dos furos realizados.

2.6 Planejamento de experimentos

Experimento pode ser formalmente definido como um teste ou uma série de testes em que são feitas mudanças intencionais nas variáveis de entrada de um processo ou sistema. De modo a observar e identificar os motivos das mudanças que podem ser percebidas nas variáveis de saída ou resposta (MONTGOMERY, 2012).

Usando planejamentos experimentais baseados nos princípios estatísticos, pode se extrair do sistema em estudo o máximo de informação útil, fazendo um número mínimo de experimentos (NETO *et al.*, 2001).

2.6.1 Método Taguchi

O método Taguchi foi desenvolvido pelo engenheiro Genichi Taguchi e seu principal objetivo é garantir a robustez do processo, de modo a reduzir as perdas através da otimização de parâmetros.

A perda de qualidade pode ser relacionada com a função de perda de Taguchi, conforme mostrado na EQ. (2.3) abaixo. Se y é a característica de qualidade em questão, e m é o valor alvo finito, então a função de perda $L(y)$ é definida como (SUNG, 1996):

$$L(y) = k(y - m)^2 \quad (2.3)$$

Genichi Taguchi cuja formação era comunicação e engenharia eletrônica, introduziu este mesmo conceito no planejamento de experimentos (KIVAK *et al.*, 2012).

2.6.1.1 Matriz ortogonal

Comparado com planejamentos experimentais tradicionais, o método Taguchi faz o uso de arranjos ortogonais (AO) especiais para examinar as características de qualidade utilizando de uma quantidade mínima de experimentos. Dessa forma, ocorre um balanceamento entre a resolução dos resultados e o custo para a execução dos experimentos.

O arranjo ortogonal adequado depende do número de fatores controláveis e de seus respectivos níveis, conforme TABELA 2.3.

TABELA 2.3 - Arranjos ortogonais Método Taguchi

Arranjo Ortogonal	Nº de Linhas	Nº máximo de fatores	Nº máximo de fatores com esses níveis			
			2	3	4	5
L ₄	4	3	3	-	-	-
L ₈	8	7	7	-	-	-
L ₉	9	4	-	4	-	-
L ₁₂	12	11	11	-	-	-
L ₁₆	16	15	15	-	-	-
L ₁₆	16	5	-	-	5	-
L ₁₈	18	8	1	7	-	-
L ₂₅	25	6	-	-	-	6
L ₂₇	27	13	-	13	-	-
L ₃₂	32	31	31	-	-	-
L ₃₂	32	10	1	-	9	-
L ₃₆	36	23	11	12	-	-
L ₃₆	36	16	3	13	-	-
L ₅₀	50	12	1	-	-	11
L ₅₄	54	26	1	25	-	-
L ₆₄	64	63	63	-	-	-
L ₆₄	64	21	-	-	21	-
L ₈₁	81	40	-	40	-	-

FONTE - Adaptado de PHADKE, 1989, p. 152.

2.6.1.2 Índice sinal - ruído

A função objetiva usada é a razão S/N, sinal/ruído, a qual é então otimizada, movendo os parâmetros alvo dentro do espaço de planejamento, a fim de reduzir os efeitos de

variações externas no comportamento do processo. No entanto, o objetivo não é apenas otimizar uma função arbitrária, mas também reduzir a sensibilidade dos parâmetros de processos à fatores incontrolláveis, ou ruídos (RAMACHANDRAN e TSOKOS, 2014).

Taguchi separou as variáveis em dois tipos, fatores de controle e fatores de ruídos. Fatores de controles, são aqueles que podem ser praticamente e economicamente controlados, tais como taxa de avanço e rotação de uma broca por exemplo. Fatores de ruído são aqueles difíceis ou caros para controlar na prática, como temperatura ambiente ou variação de parâmetros dentro de uma faixa de tolerância (O'CONNOR, *et. al.*, 2002 apud KIVAK *et al.*, 2012).

Para a estimativa do nível ótimo da característica e atender as especificações do produto ou atingir uma robustez do processo, o método desenvolvido por Taguchi apresenta funções S/N, que devem ser escolhidas de acordo com aquela que melhor descreve a condição a ser otimizada, conforme Sung (1996):

- **Nominal é melhor:**

$$S/N = 10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{s^2} \right) \quad (2.4)$$

- **Menor é melhor:**

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2.5)$$

- **Maior é melhor:**

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (2.6)$$

Onde, n , i , y , são o número de repetições, índice e valor da amostra respectivamente, (\bar{y}/s) é a razão entre a média e o desvio padrão.

Basicamente o desenvolvimento de experimentos pelo método de Taguchi, assim como na metodologia empregada neste trabalho, segue os seguintes passos (KIVAK *et al.*, 2012):

- Determinar os fatores de controle.

- Determinar os níveis para cada fator de controle e selecionar o apropriado arranjo ortogonal.
- Atribuir os fatores de controle à matriz ortogonal selecionada e conduzir os experimentos.
- Analisar os dados, determinar os níveis dos fatores que minimizam os ruídos e a contribuição de cada fator (ANOVA).
- Executar a confirmação dos experimentos.

Osman *et al.*, (2017) utilizaram o método Taguchi e análise de variância (ANOVA) para determinar os parâmetros ótimos de usinagem e a contribuição de cada fator no diâmetro médio dos furos realizados no aço AISI D2. Os parâmetros selecionados foram as velocidades de corte de 16, 19 e 21 m/min, avanço de 0,14, 0,21 e 0,30 mm/rev e brocas de aço rápido revestidas de TiN, TiCN e TiAlN. Um arranjo ortogonal L₉ (3³) de Taguchi foi utilizado no software Minitab 17 para análise dos resultados. Seis furos foram realizados com cada ferramenta e o valor médio do diâmetro medido em cada condição foi obtido conforme dados da coluna C4 da TABELA 2.4. Observando a condição escolhida, menor é melhor, ambos os valores da função sinal ruído (C5) e da média (C6) foram plotados, conforme gráficos da FIGURA 2.13 e FIGURA 2.14.

TABELA 2.4 - Valores para razão sinal ruído (S/N) e desvios de diâmetro.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	avanço (mm/rev)	vel. corte (m/mim)	HSS +	diâmetro méd. (mm)	S/N	média (mm)
1	0,14	16	TiN	11.1007	-20.9152	11.1112
2	0,14	19	TiCN	11.0417	-20.8545	11.0338
3	0,14	21	TiAlN	11.0891	-20.9030	11.0955
4	0,21	21	TiN	11.0990	-20.8995	11.0911
5	0,21	16	TiCN	11.0251	-20.8457	11.0225
6	0,21	19	TiAlN	11.0892	-20.9062	11.0997
7	0,30	19	TiN	11.1512	-20.9445	11.1486
8	0,30	21	TiCN	11.0454	-20.8718	11.0559
9	0,30	16	TiAlN	11.1498	-20.9391	11.1419

FONTE – Adaptado de OSMAN *et al.*, 2017, p. 9647.

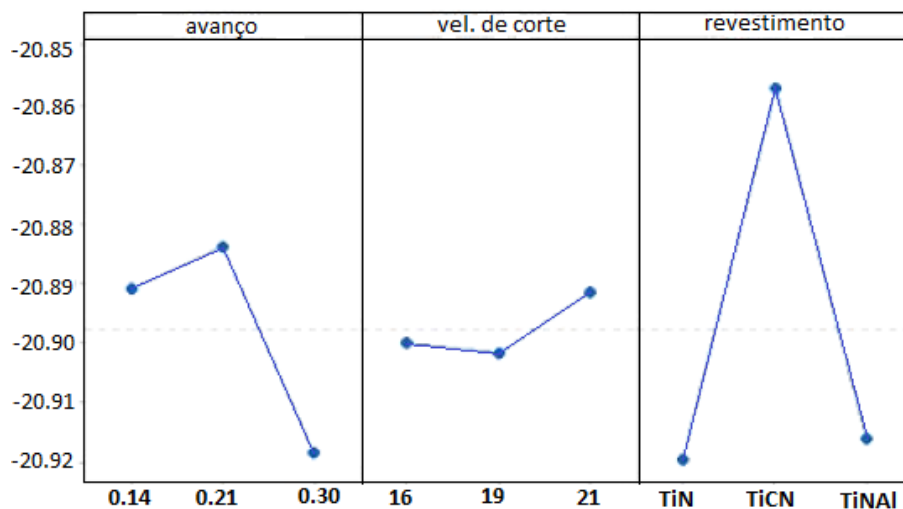


FIGURA 2.13 - Razão sinal ruído (S/N)

FONTE - Adaptado de OSMAN et al., 2017, p. 9648

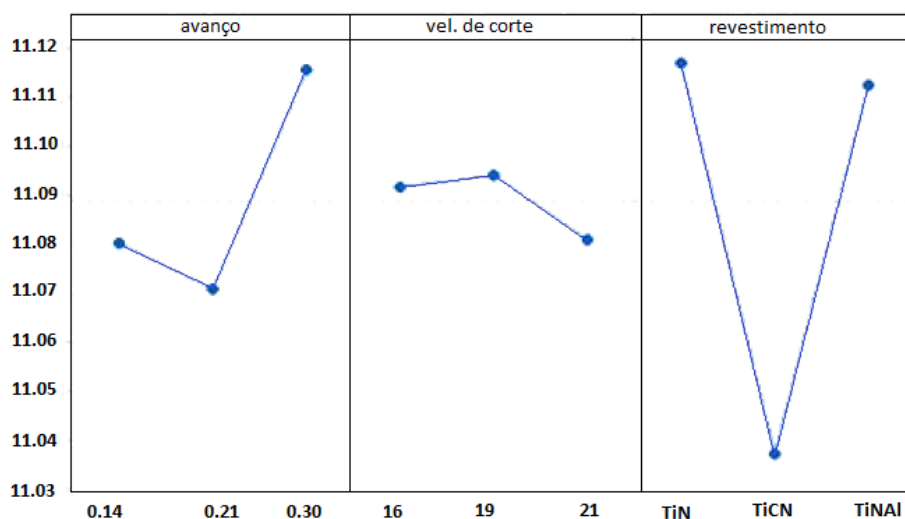


FIGURA 2.14 - Desvio médio dos diâmetros

FONTE - Adaptado de OSMAN et al., 2017, p. 9648

Os gráficos obtidos evidenciam que os parâmetros ótimos sugeridos pelo método Taguchi são o avanço no segundo nível (0,21 mm/rev), a velocidade de corte no terceiro nível (21 m/min) e o segundo nível para a ferramenta (HSS + TiCN), ou seja, esta combinação de fatores, minimiza os ruídos na variável resposta. Osman *et al.*, (2017) por meio da análise ANOVA identificaram também que o revestimento foi o fator mais impactante no diâmetro médio dos furos, (26,46% para o avanço, 1,86% velocidade de corte e 74,32% para o revestimento). Os autores atribuem ao melhor desempenho do revestimento TiCN perante ao TiN e TiAlN, às características de resistência a abrasão e da elevada dureza do revestimento,

que protege melhor a aresta cortante contra desgaste. Foi obtido um erro de 0,42% entre o valor estimado e o valor de confirmação para a resposta em circularidade dos parâmetros ótimos encontrados.

Kivak *et al.* (2012) otimizaram parâmetros na furação do aço AISI 316 através da técnica de Taguchi a fim de obter o valor mínimo de rugosidade superficial (R_a) na superfície acabada e menores forças de avanço (F_f) durante a furação. Os experimentos foram conduzidos utilizando o arranjo ortogonal L_{16} . Três parâmetros ou fatores de controle foram utilizados: brocas de aço rápido M35 revestidas (TiN, TiAlN-N e TiAlN/TiN) e não revestidas, velocidade de corte (12 a 18 m/min) e avanço (0,10 e 0,12 mm/rev), sem a utilização de fluido de corte. A razão S/N “menor é melhor” de Taguchi foi escolhida, sendo a menor rugosidade superficial (R_a) e menor força de avanço, a condição de qualidade desejada. A análise de variância ANOVA também foi utilizada para determinar o percentual de contribuição de cada fator. Como mostrado na FIGURA 2.15 e FIGURA 2.16, a menor rugosidade superficial foi obtida com a seguinte combinação: revestimento de TiAlN-N, velocidade de corte de 18m/min e taxa de avanço de 0.12 mm/rev. E para a menor força de avanço, a combinação indicada foi: ferramenta sem revestimento, velocidade de corte de 16 m/min e taxa de avanço de 0,1 mm/rev.

Os autores afirmam que o melhor desempenho do TiAlN-N, quanto a rugosidade superficial (R_a) medida, se deve à baixa condutividade, alta dureza e alta adesão do revestimento. Foi observado, porém, que os revestimentos não apresentaram impacto significativo na força de avanço, com 8,4% de contribuição. A rugosidade reduziu com o aumento da velocidade de corte, o que os autores atribuem à redução do fenômeno da aresta postiça de corte (APC), melhorando o acabamento superficial. Similarmente, a força de avanço reduz com o aumento da velocidade de corte até 16 m/min e em seguida ela aumenta. O aumento da velocidade corte eleva também a temperatura, e reduz a resistência do material ao corte, porém quando se eleva ainda mais, pode estar potencializando o desgaste da ferramenta, justificando assim o observado aumento da força de avanço. E ainda, com o aumento da taxa de avanço, ocorre o aumento na seção do cavaco, a força de avanço também aumenta significativamente. Contudo, foi observado que a taxa de avanço não apresentou contribuição significativa à rugosidade superficial, apenas 7,16%.

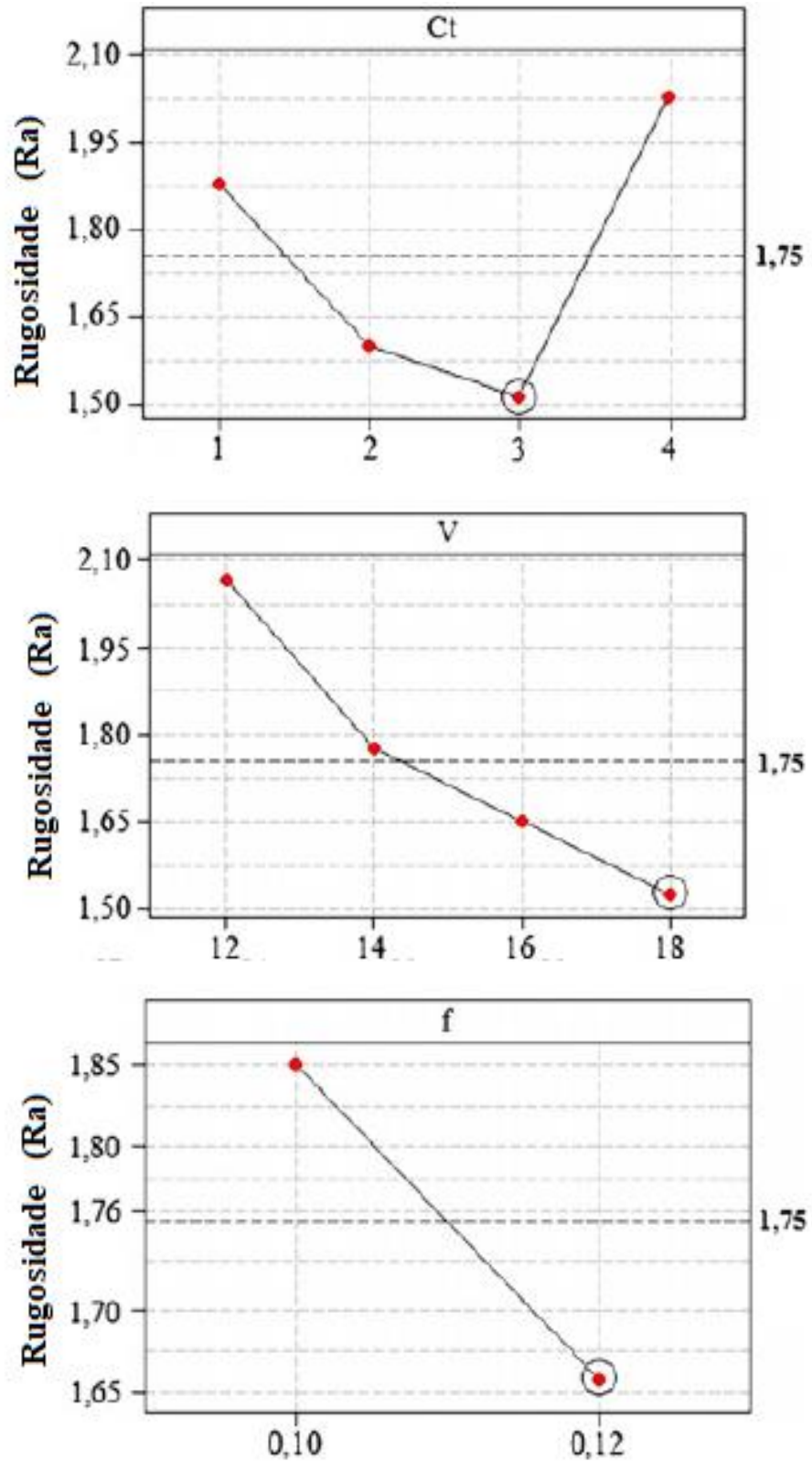


FIGURA 2.15 - Resultado da rugosidade superficial (Ra) com os fatores de controle: Ct - ferramenta de corte, V - velocidade de corte e f - avanço.

FONTE - Adaptado de KIVAK *et al.*, 2012, p. 1555

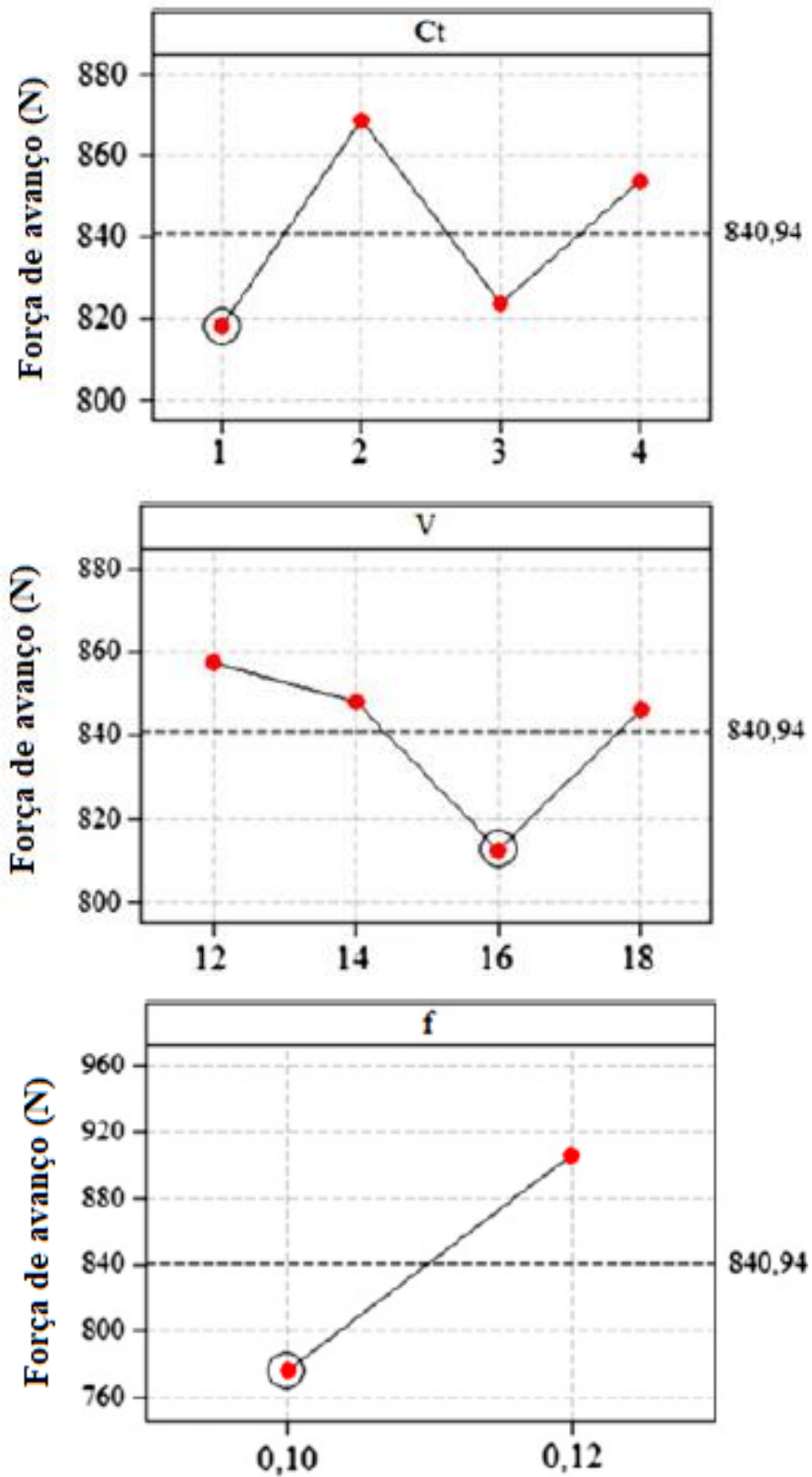


FIGURA 2.16 - Resultado da força de avanço (F_f) com os fatores de controle: Ct - ferramenta de corte, V - velocidade de corte e f - avanço

FONTE - Adaptado de KIVAK *et al.*, 2012, p. 1555

Kurt *et al.* (2009) utilizaram Taguchi para otimizar o acabamento superficial e os desvios de circularidade na furação a seco da liga Al 2024. Os fatores de controle utilizados foram velocidade de corte (30, 45, 60 m/min), avanço (0,15, 0,20 e 0,25 mm/rev), profundidade dos furos (15 e 25 mm) e diferentes ferramentas (HSS, HSS + TiN e HSS + TiAlN). Onde para desvios de circularidade, um arranjo ortogonal L_{18} ($3^3 2^1$) onde todos os fatores e seus níveis listados acima foram utilizados. Para o acabamento superficial (R_a) foi utilizado um arranjo ortogonal L_9 (3^3), sem o fator profundidade do furo. Os autores encontraram para os desvios de circularidade como fatores que minimizam os efeitos dos ruídos, a velocidade de corte de 30 m/min, taxa de avanço de 0,15 mm/rev, profundidade de furo de 25 mm e ferramenta HSS sem revestimento. Para o acabamento superficial (R_a), os fatores ótimos encontrados foram taxa de avanço de 0,15 mm/rev, velocidade de corte de 30 m/min e a ferramenta de HSS sem revestimento. Através da análise de variância ANOVA, foi identificado o percentual de contribuição de cada fator na variável resposta R_a (35,46% para taxa de avanço, 6,15% velocidade de corte e 53,84% revestimento) e circularidade (8,18% profundidade do furo, 74,09% taxa de avanço, 6,04% velocidade de corte e 0,10% revestimento). Kurt *et al.* (2009) obtiveram 2,8% e 5,9% de erro na estimativa e confirmação dos valores ótimos de circularidade e acabamento superficial (R_a) respectivamente.

Siddiquee *et al.* (2014) utilizaram o método Taguchi para otimização de parâmetros a fim de minimizar a rugosidade superficial na furação do aço austenítico AISI 321 com brocas de metal duro. Quatro parâmetros ou fatores de controle foram utilizados, sendo eles: fluido de corte, velocidade de corte, avanço e profundidade do furo, cada um com 3 níveis, exceto o fluido de corte que foi 2 níveis, com e sem (TABELA 2.5). Foi utilizado um arranjo ortogonal L_{18} de Taguchi e análise de variância ANOVA para determinar quais níveis dos parâmetros de usinagem afetam significativamente a rugosidade superficial e qual a porcentagem de contribuição individual de cada parâmetro.

TABELA 2.5 - Parâmetros de corte e seus níveis

Fator	Nível 1	Nível 2	Nível 3
A - Fluido de corte	sem	com	-
B - Velocidade de corte (m/min)	9	12	15
C - Avanço (mm/rev)	0,006	0,008	0,010
D - Profundidade do furo (mm)	25	30	35

FONTE - Adaptado de SIDDIQUEE *et al.*, 2014, p. 1220

Foi utilizada a função S/N “menor é melhor” indicando que valores menores de rugosidade superficial (Ra) representam o fator de qualidade a ser otimizado. Os resultados mostraram que a melhor combinação dos fatores em seus níveis que minimizam a rugosidade superficial foi A₂B₃C₂D₁, ou seja, com a presença do fluido de corte, a velocidade de corte de 9 m/min, avanço a 0,008 mm/rev e profundidade do furo em 25 mm. O resultado da análise de variância ANOVA indicou que todos os quatro parâmetros afetaram significativamente a variável resposta, com a maior contribuição da rotação (27,02%), seguida pelo fluido de corte (25,10%), taxa de avanço (22,99%) e profundidade do furo (14,29%).

Motorcu *et al.*, (2014) encontraram que o valor da rugosidade superficial (Ra) aumentou com o desgaste das ferramentas, quando utilizando brocas de metal duro revestidas com TiN e não revestidas na furação de superligas de Ni. E pelo método Taguchi, utilizando um arranjo ortogonal L18 juntamente com a análise de regressão determinaram que os parâmetros que mais impactaram nos valores de Ra foram ângulo na extremidade da ferramenta (49,44%), a taxa de avanço (15%), a velocidade de corte (15,45%) e o revestimento (13,47%).

Sumesh e Shibu (2016) utilizaram a técnica de Taguchi para obter a mínima rugosidade superficial (Ra) na furação do ferro fundido usando brocas helicoidais de aço rápido. Os experimentos foram conduzidos usando arranjo ortogonal L₉ seguido da análise de variância ANOVA. Os autores encontram que o diâmetro da ferramenta foi o fator mais significativo entre os parâmetros de controle selecionados que foram velocidade de corte (11,38%), avanço (20,44%) e diâmetro da ferramenta (25,18%). E que o melhor acabamento superficial foi alcançado com a menor velocidade de corte, o menor avanço e com o menor diâmetro.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os materiais, os procedimentos experimentais e equipamentos envolvidos nos ensaios realizados.

3.1 Aço ABNT 4340

O aço ABNT 4340 de composição da TABELA 3.1, foi adquirido comercialmente em chapas de formato retangular com as dimensões 67 x 100 x 16 mm, como corpo de prova para os experimentos.

TABELA 3.1 - Análise química Aço ABNT 4340

Al	C	Cr	Mn	Mo	Ni	P	S	Si	Ti
0,025	0,360	0,684	0,580	0,221	1,728	0,016	0,006	0,220	0,027

FONTE - O autor

Conforme análise química, percebe-se que o material apresentou teor de carbono abaixo da faixa indicada pela norma ANBT NBR 6006 para este aço (entre 0,38 e 0,43% em peso).

O material foi tratado termicamente pelo processo de recozimento, para o alívio de tensões e homogeneização. O recozimento foi realizado em temperatura de 690°C mantida durante um período de 4 horas, seguido do resfriamento dentro do próprio forno até temperatura ambiente. Após o tratamento térmico foi realizado o ensaio de dureza Vickers (HV) com o durômetro WOLPERT modelo D-6700. A média de seis medições indicou uma dureza de 240 ± 1 HV.

Em seguida, as chapas foram levadas ao centro de usinagem para fresamento, a fim de se garantir uma planicidade das superfícies, retirar carepas e oxidações adquiridas no tratamento térmico. E, também, realizar os furos para fixação do corpo de prova no equipamento de medição das forças de avanço, ficando a peça conforme detalhamento da FIGURA 3.1 .

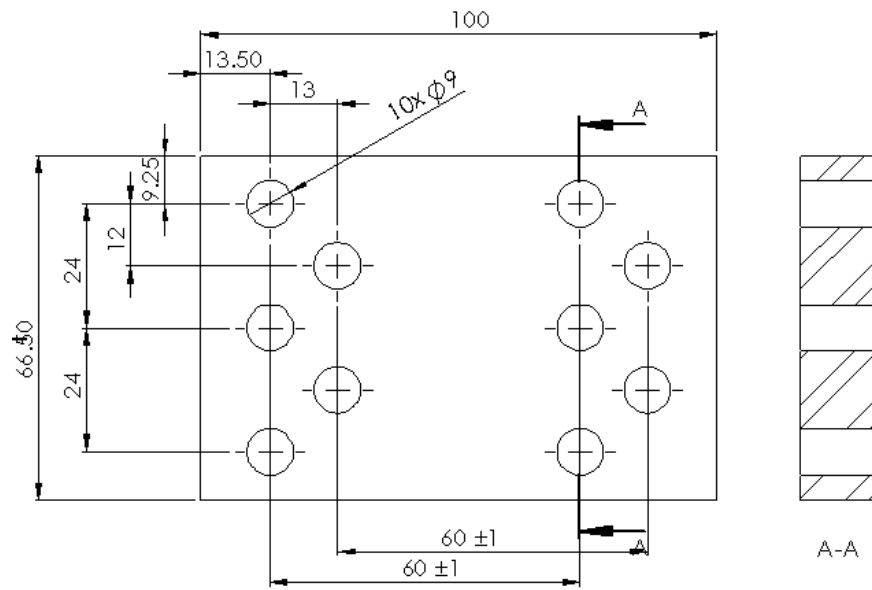


FIGURA 3.1 - Detalhamento para preparação dos corpos de prova.

FONTE - O autor.

3.1.1 Microestrutura

Uma amostra do aço ABNT 4340 foi encaminhada para análise microestrutural no laboratório de materiais da FCA, e as imagens da FIGURA 3.2 seguir foram obtidas após ataque químico com Nital a 4%.

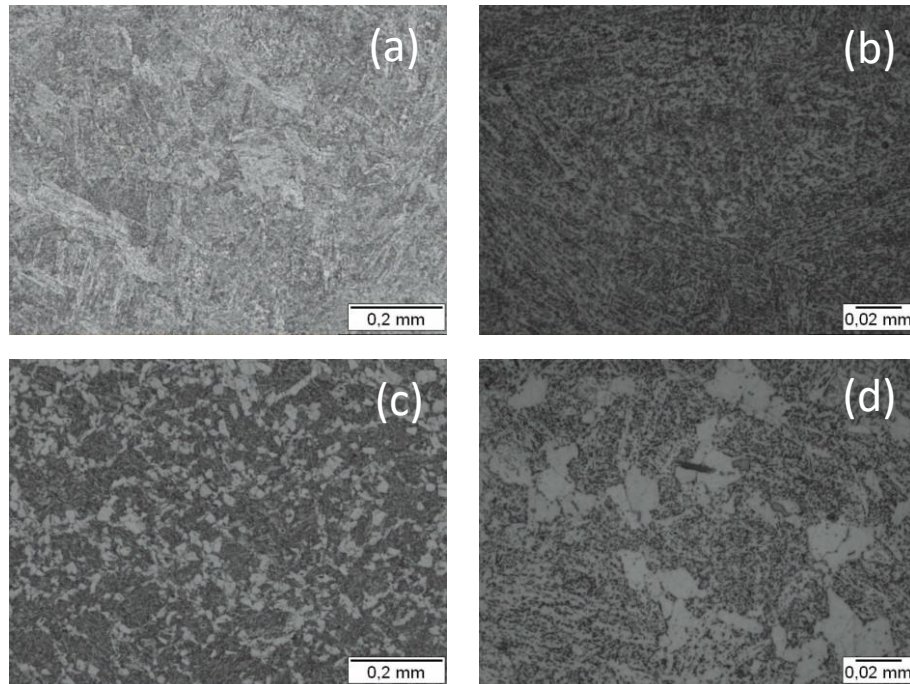


FIGURA 3.2 - Micrografia do núcleo (a) e (b) com ampliação de 100x e 500x respectivamente e da superfície do aço ABNT 4340 (c) e (d) ampliação de 100x e 500x respectivamente.

FONTE - O autor

É visível a presença das fases ferrítica (branca) e perlítica (escura), típicas do aço ABNT 4340 (CARDOSO, 2011). Observa-se que as ligas no núcleo, FIGURA 3.2(a) e FIGURA 3.2(b), encontraram-se mais densas que as da superfície, FIGURA 3.2(c) e FIGURA 3.2(d).

3.2 Brocas helicoidais

As ferramentas selecionadas para realização deste trabalho foram 24 brocas helicoidais de aço rápido ABNT M2 padrão DIN 338 (FIGURA 3.3), diâmetro de 6,00 mm, com afiação preparada pela empresa Nipo Tec Ind Com LTDA.

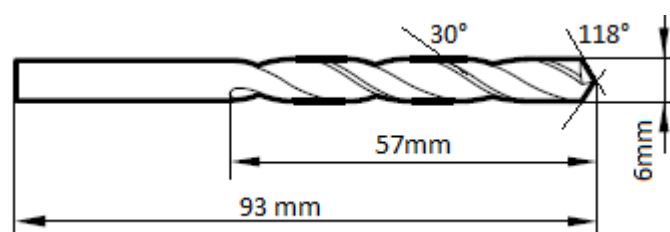


FIGURA 3.3 - Broca 6,00mm padrão DIN 338.

FONTE - Adaptado de GÜHRING, 2016, p. 269

Essa afiação é realizada com o intuito de diminuir o comprimento da aresta transversal de corte por meio do adelgaçamento de núcleo (FIGURA 3.4). Facilita a penetração da broca no início do corte, ajuda a manter a concentricidade do furo e também impacta na força de avanço durante a furação. Porém pode ocorrer a fragilização da aresta transversal.

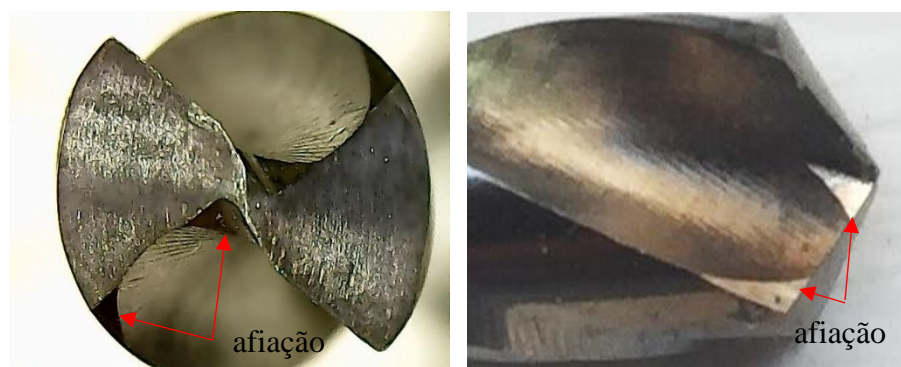


FIGURA 3.4 - Afiação preparada na ponta das brocas.

FONTE - O autor

As brocas de aço rápido foram encaminhadas para aplicação dos revestimentos a base de TiN e TiAl pela técnica de PVD na empresa Oerlikon Balzers Revestimentos Metálicos LTDA. As 24 ferramentas foram separadas em quatro tipos: aço rápido ABNT M2 sem revestimento, revestido com TiN, revestido com TiAl e revestido com TiAl multicamadas (ou Balinit Pertura como comercialmente conhecido) conforme organizado na TABELA 3.2. e ilustrado na FIGURA 3.5.

TABELA 3.2 - Revestimentos aplicados nas brocas de aço rápido ABNT M2

Base do revestimento	Qte.	Características			
		Cor	Camada	Dureza (GPa)	Temperatura máx. operação
TiN _(PVD)	06	amarelo-ouro	mono	30 ± 3	600
TiAl _(PVD)	06	cinza-violeta	mono	33 ± 3	900
TiAl-M _(PVD)	06	cinza-violeta	multi	35 ± 3	1000

FONTE - Adaptado de Oerlikon, 2018.



FIGURA 3.5 - Brocas aço rápido ABNT M2 6,00mm sem revestimento, revestida com TiN, TiAlN e TiAlN multicamadas respectivamente da esquerda para a direita.

FONTE - O autor

3.3 Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

Uma broca das seis de cada grupo de revestimento foi preparada para visualização no microscópio eletrônico de varredura. O equipamento utilizado foi o MEV Quanta 250 do laboratório de análise de materiais da FCA de Betim/MG. A preparação consistiu em um corte de seção transversal próximo a ponta da broca, seguido do devido embutimento para manter a integridade do revestimento (FIGURA 3.6). Em seguida a amostra foi polida a fim de se remover marcas originadas do corte de seção.

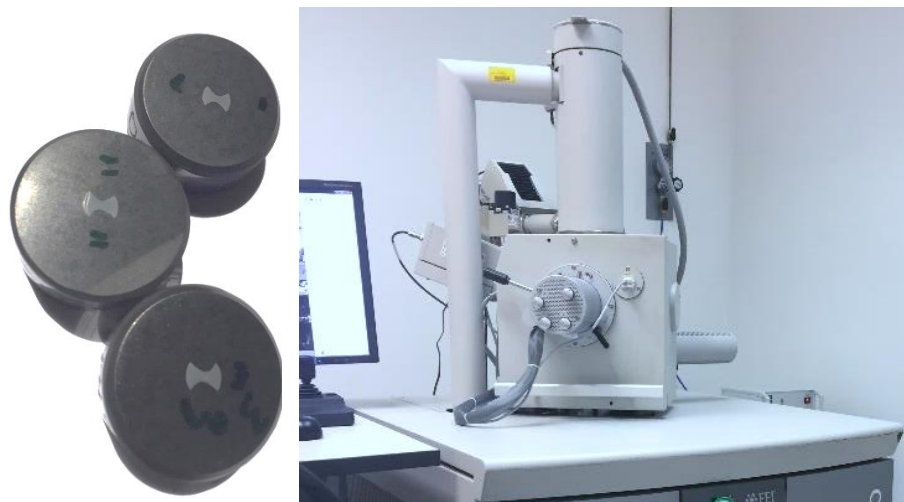


FIGURA 3.6 - Amostras embutidas e MEV Quanta 250

FONTE - O autor

O objetivo nesta análise foi observar a camada depositada e obter uma estimativa da espessura de cada revestimento. Bem como a análise de espectroscopia de energia dispersiva, EDS, disponível no mesmo equipamento, utilizada para identificar a presença elementar nas amostras.

3.4 Técnica de Taguchi

Seguindo a metodologia Taguchi, foram selecionadas as brocas (sem revestimento e com revestimento de TiN, TiAl e TiAl-M), a velocidade de corte (v_c) e o avanço (f), como parâmetros de controle para se avaliar os valores de força de avanço (F_f) e rugosidade superficial (R_a). Todo o experimento foi realizado sem a utilização de fluidos de corte. Os níveis de cada parâmetro de controle escolhido encontram-se na TABELA 3.3. Esses valores foram determinados com base no catálogo do fabricante e na literatura (IRWIN, 2017; KIVAK *et al.*, 2012).

TABELA 3.3 - Parâmetros de controle e seus níveis

Índice	Parâmetro	Níveis			
		1	2	3	4
A	revestimento	sem	TiN	TiAl	TiAl-M
B	velocidade de corte (m/min)	12	14	16	18
C	avanço (mm/rev)	0,10	0,12	-	-

FONTE - O autor

O primeiro passo no método Taguchi é a escolha do arranjo ortogonal (AO) apropriado para os parâmetros de controle selecionados. Assim, o arranjo apropriado escolhido foi o AO L₁₆ (4 x 4 x 2), de modo a obter os parâmetros ótimos e analisar os seus efeitos. Desta forma os 16 ensaios das 32 combinações possíveis foram realizados conforme configuração da TABELA 3.4.

No método Taguchi os arranjos ortogonais garantem um desempenho experimental efetivo nos testes com o número mínimo de ensaios realizados (KIVAK *et al.*, 2012).

TABELA 3.4 - Arranjo ortogonal Taguchi L₁₆ (4 x 4 x 2)

Nº Ensaio	A	B	C	Nº Ensaio	A	B	C
1	1	1	1	9	3	1	2
2	1	2	1	10	3	2	2
3	1	3	2	11	3	3	1
4	1	4	2	12	3	4	1
5	2	1	1	13	4	1	2
6	2	2	1	14	4	2	2
7	2	3	2	15	4	3	1
8	2	4	2	16	4	4	1

FONTE - O autor

As variáveis resposta, força de avanço (F_f) e rugosidade superficial (R_a) foram coletadas para cada ensaio realizado, e posteriormente analisadas no software Minitab 17 segundo a razão sinal ruído (S/N) adequada de Taguchi. No presente trabalho optou-se pela função menor é melhor (EQ. 2.5), ou seja, foi definido como combinação ótima, aquela que atendeu ao critério de qualidade escolhido: menor força de avanço (F_f) e menores valores de R_a .

Para cada ensaio da TABELA 3.4 foi usada uma broca nova, a fim de se evitar o efeito do desgaste das ferramentas. Foi realizado para cada ensaio também, uma réplica com a mesma ferramenta, a fim de se conferir os valores coletados. Por exemplo, para executar o ensaio A1B1C1, foi utilizada a broca de aço rápido ABNT M2 sem revestimento de diâmetro de 6,00 mm, que executou um furo cego com 11 mm de profundidade, com velocidade de corte de 12 m/min e taxa de avanço de 0,10 mm/rev, seguido de uma réplica nas mesmas condições.

3.4.1 Medição da força de avanço F_f

Os ensaios foram realizados a seco no centro de usinagem ROMI, modelo Discovery 560 do laboratório de usinagem da UFMG, cujas configurações básicas são rotação máxima de 7500 rpm, 9000 W de potência e deslocamento máximo nos eixos $X = 560$ mm, $Y = 406$ mm e $Z = 508$ mm.

Para adquirir os sinais de força de avanço (F_f), gerados com a furação, os corpos de prova previamente preparados foram fixados sobre o dinamômetro piezoelétrico Kistler, modelo 9272 que por sua vez foi fixado à mesa do centro de usinagem, conforme esquema da FIGURA 3.7. Um sistema de aquisição e amplificação de sinais foi utilizado para condicionar os sinais de F_f provenientes do dinamômetro. A aquisição dos sinais foi realizada a uma taxa de 340 pontos por segundo, e o processamento foi realizado via software LabVIEW.

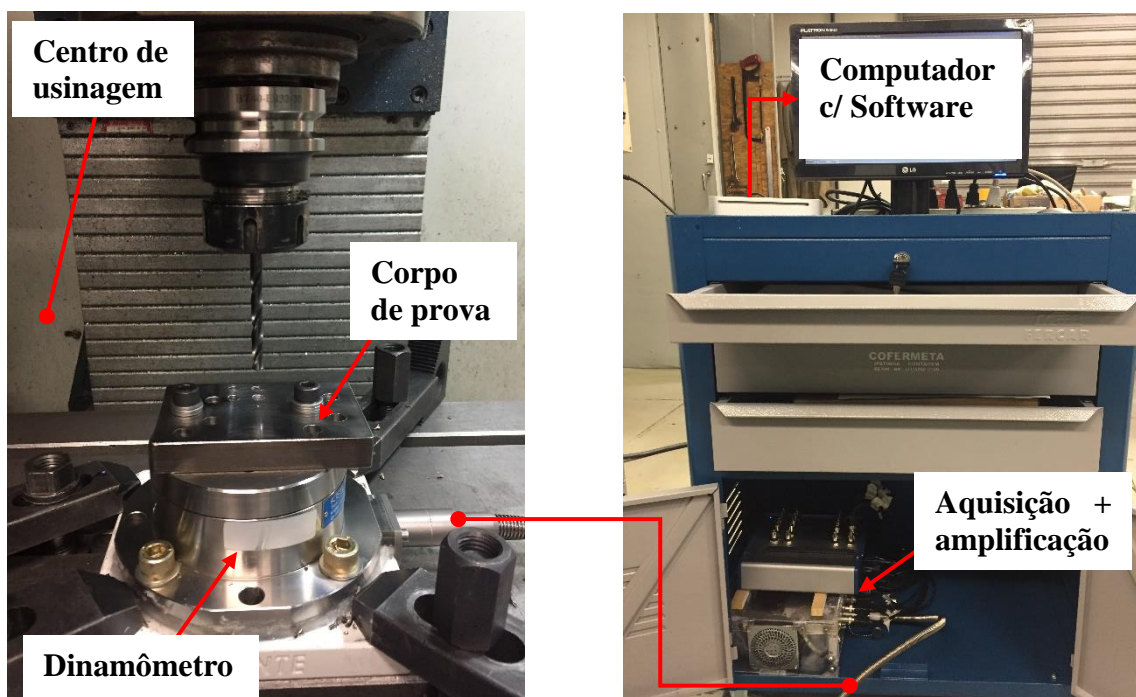


FIGURA 3.7 - Esquema de montagem do experimento

FONTE - O autor

3.4.2 Medição da rugosidade R_a

Para medição da rugosidade na superfície dos furos ($\varnothing 6$ mm) expressa no parâmetro R_a , primeiramente foi necessário seccionar cada corpo de prova transversalmente no eixo dos

furos, conforme FIGURA 3.8, de modo que a agulha do rugosímetro pôde ter acesso livre para realização das medições. Os cortes foram feitos por eletroerosão a fio.

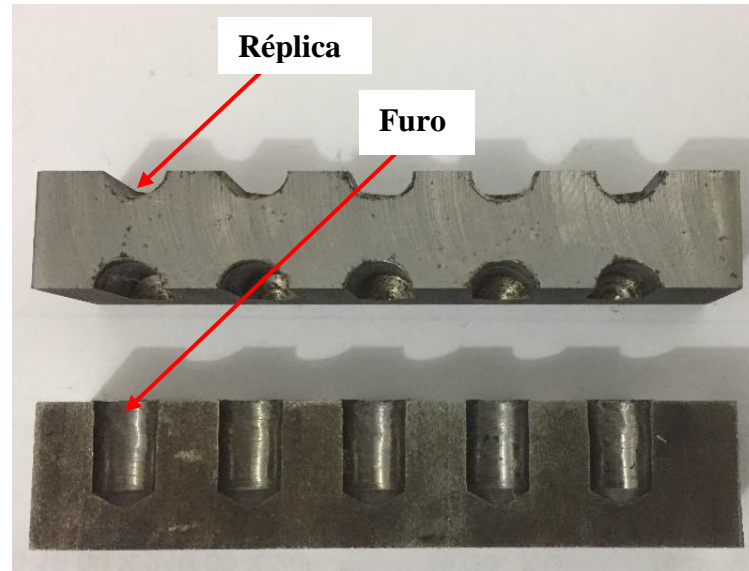


FIGURA 3.8 - Corpo de prova seccionado para medição da rugosidade (Ra).

FONTE: O autor

A obtenção dos valores de Ra para a superfície dos furos foi feita por meio da média de duas medições em uma parede do furo. As medições foram realizadas com o rugosímetro digital da marca Mitutoyo, modelo SJ-210 (FIGURA 3.9). O comprimento de amostragem (l_r) e o comprimento de avaliação (l_n) foram de 0,8 e 4 mm respectivamente.

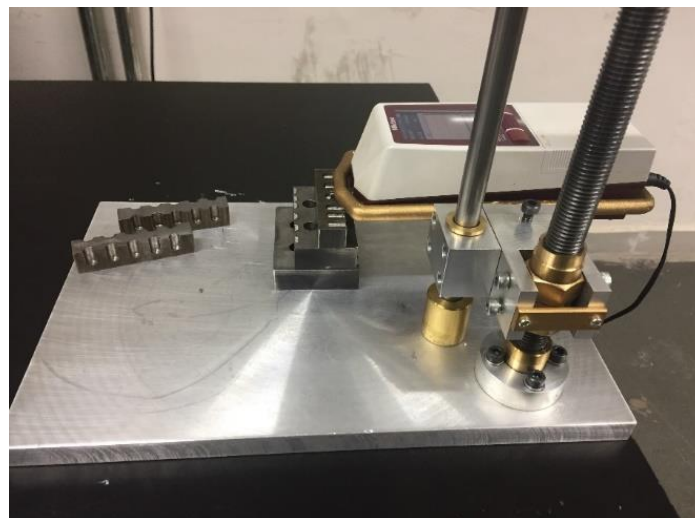


FIGURA 3.9 - Medição da rugosidade superficial Ra.

FONTE - O autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentadas as análises de microscopia para caracterização básica dos revestimentos e o resultado da utilização do Método Taguchi e ANOVA para otimização dos parâmetros de qualidade escolhidos.

4.1 Caracterização dos revestimentos

Uma amostra de cada broca revestida foi preparada conforme descrito na seção 3.3 e levadas ao microscópio eletrônico de varredura - MEV, para observação e medição da espessura do filme de revestimento.

4.1.1 Espessura média das camadas

Na TABELA 4.1 encontra-se a média aritmética e o desvio padrão de cinco medidas de espessura realizadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) em uma amostra de cada tipo de revestimento utilizado, conforme imagens da FIGURA 4.1, FIGURA 4.2 e FIGURA 4.3. Nas figuras foram indicadas as regiões que supostamente representam o embutimento, revestimento e substrato.

TABELA 4.1 - Média e desvio padrão da espessura dos revestimentos

Revestimento	Medida 01 (µm)	Medida 02 (µm)	Medida 03 (µm)	Medida 04 (µm)	Medida 05 (µm)	Média (µm)	Desvio padrão S
TiN	2,833	2,752	2,725	2,889	2,563	2,752	0,111
TiNAl	3,831	3,669	3,561	3,291	3,372	3,545	0,196
TiNAl-M	3,319	3,426	3,399	3,264	3,292	3,340	0,062

FONTE - O autor

Conforme dados da tabela, observa-se que o revestimento a base de TiN foi o que obteve a menor espessura média entre as espessuras analisadas, $2,752 \pm 0,111$ µm. TiNAl e TiNAl-M apresentaram medidas de espessura estatisticamente iguais, e o revestimento de TiNAl-M foi o que obteve o menor desvio padrão entre as amostras analisadas (0,062), indicando maior regularidade da camada depositada nas faixas observadas.

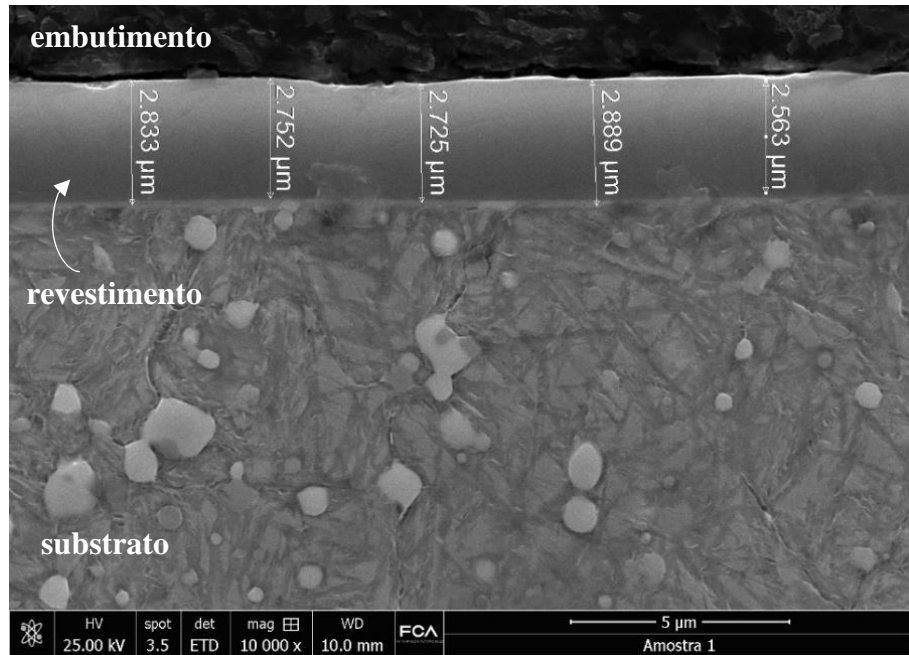


FIGURA 4.1 - Imagem obtida por MEV com medidas de espessuras do revestimento TiN.

FONTE - O autor

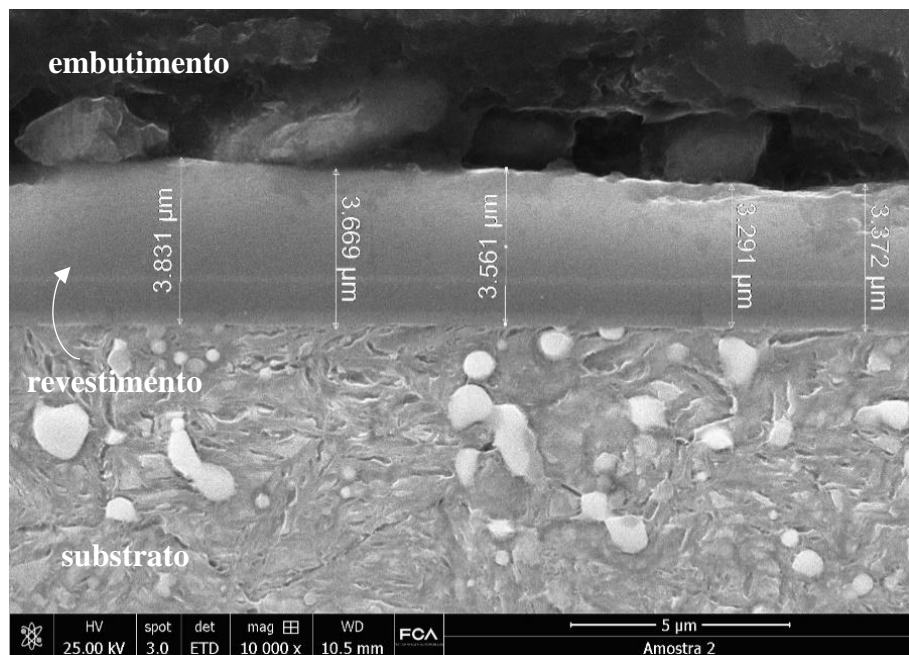


FIGURA 4.2 - Imagem obtida por MEV com medidas de espessuras do revestimento TiAl.

FONTE - O autor

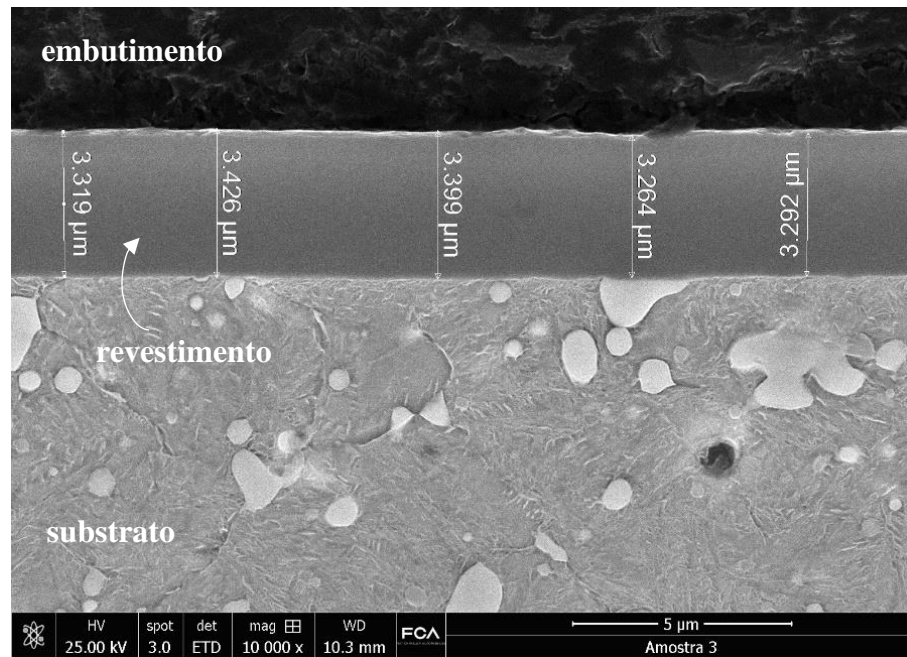


FIGURA 4.3 - Imagem obtida por MEV com medidas de espessuras do revestimento TiAl-M.

FONTE - O autor

4.1.2 Composição elemental - EDS

Pela análise de EDS foi avaliada a presença elemental em regiões específicas dos revestimentos TiN, TiAl e TiAl-M, e também no substrato (aço rápido ABNT M2), conforme imagens da FIGURA 4.4, FIGURA 4.5 e FIGURA 4.6.

Na FIGURA 4.4, foi selecionada uma região supostamente no interior do revestimento TiN e outra região na suposta interface visível substrato/revestimento, regiões 01 e 02 respectivamente. No gráfico (01) foi registrado a presença de Ti, N, C e Fe. No gráfico (02), região supostamente próxima ao substrato foi observado além dos elementos da região 01, a presença de W, Cr, V e Mo, que são elementos de liga do aço rápido ABNT M2 e também utilizados pelos fabricantes de ferramentas em camadas intermediárias a fim melhorar a adesão do TiN ao aço rápido (GERTH e WIKLUND, 2008). Confirmando a proximidade da região 02 ao substrato.

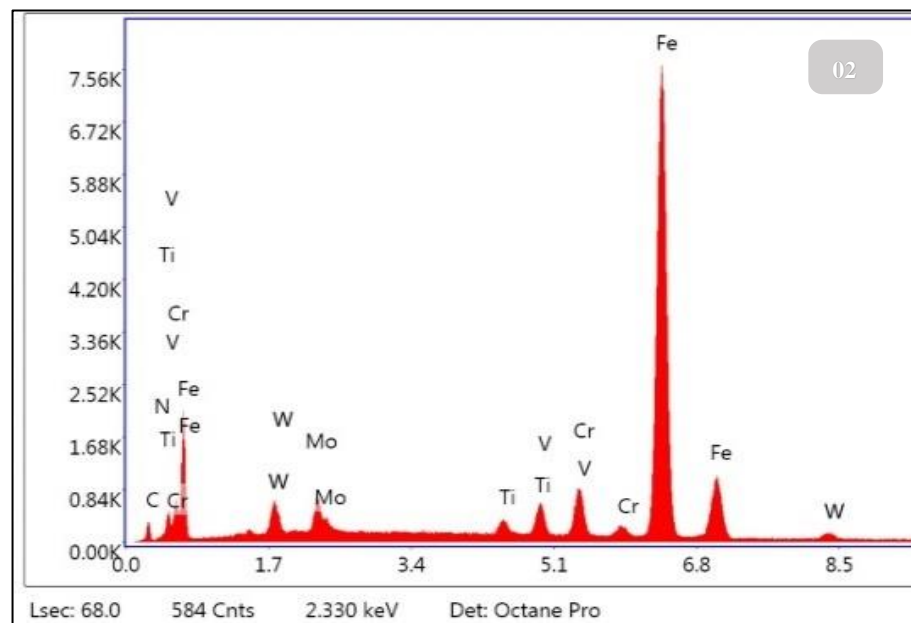
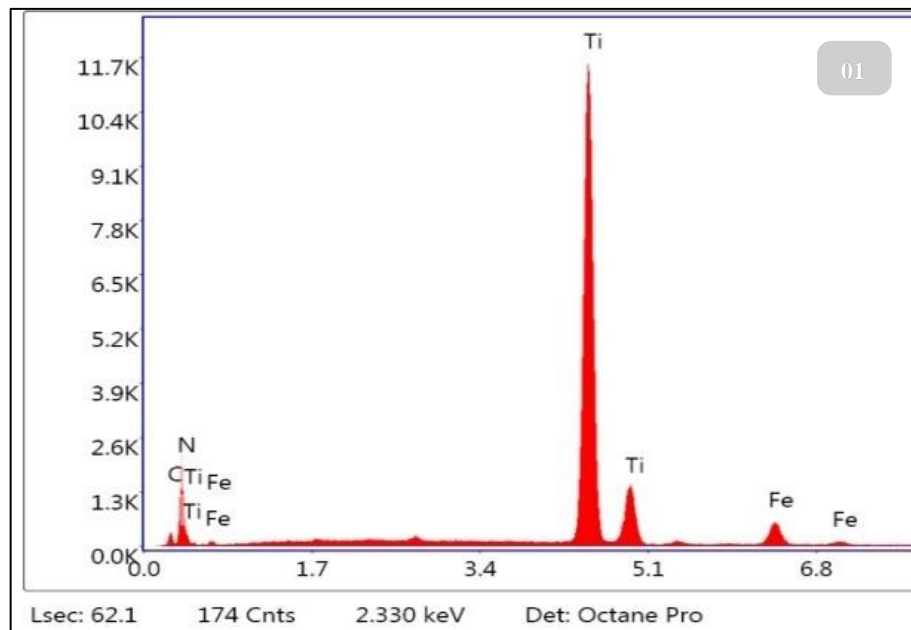
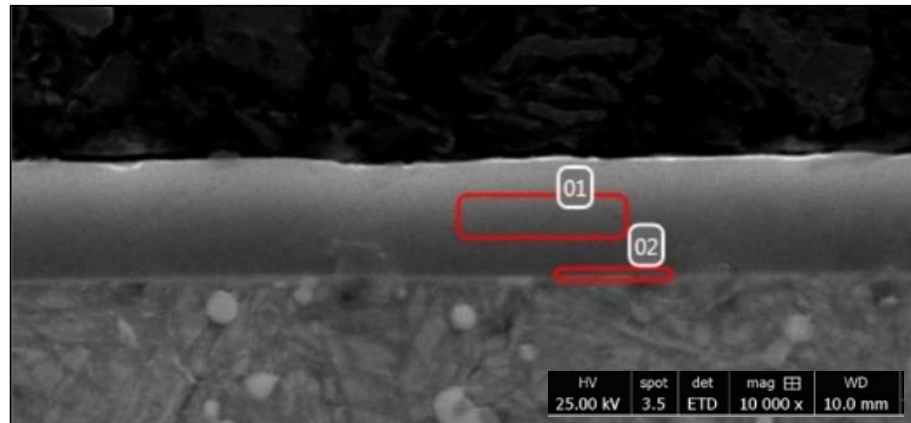


FIGURA 4.4 - Presença elementar no revestimento TiN

FONTE - O autor

Na FIGURA 4.5 foram observados o revestimento de TiNAl e o substrato em 06 regiões:

- **Região 01:** do centro da suposta camada do revestimento para a superfície (embutimento). Os elementos presentes foram Ti, Al, N, C, Fe e Si,
- **Região 02:** em uma linha clara visível no interior do revestimento. Os elementos presentes foram: Fe, Ti, C, N, V.
- **Região 03:** abaixo da região 02 e próximo ao que aparentou ser uma interface entre substrato e revestimento. Elementos: Fe, Ti, C, N, Al, Cr, W e Mo.
- **Região 04:** na suposta interface, próximo da superfície do substrato. Elementos: Fe, Ti, C, Al, Cr, V, W e Mo.
- **Região 05:** no interior do substrato, numa região mais escura da imagem, que supostamente é a matriz ferrítica do aço rápido ABNT M2. Os elementos presentes observados foram: Fe, Ti, C, Cr, V, W e Mo.
- **Região 06:** no interior do substrato, na região mais clara que aparece em aglomerados dentro da matriz escura, o que supostamente são os carbonetos do aço rápido ABNT M2. Os elementos presentes foram: W, Mo, Fe, Cr, V e C.

Na FIGURA 4.6, encontra-se o resultado da observação do interior da camada de TiNAl-M, sendo o gráfico (01) referente a região circulada no interior da camada, cujos elementos presentes encontrados foram: Ti, C, N, Fe, Al e Si. No gráfico (02), região de suposta interface substrato revestimento, foram encontrados os seguintes elementos: Ti, Cr, Fe, C, Si, Al, W e Mo.

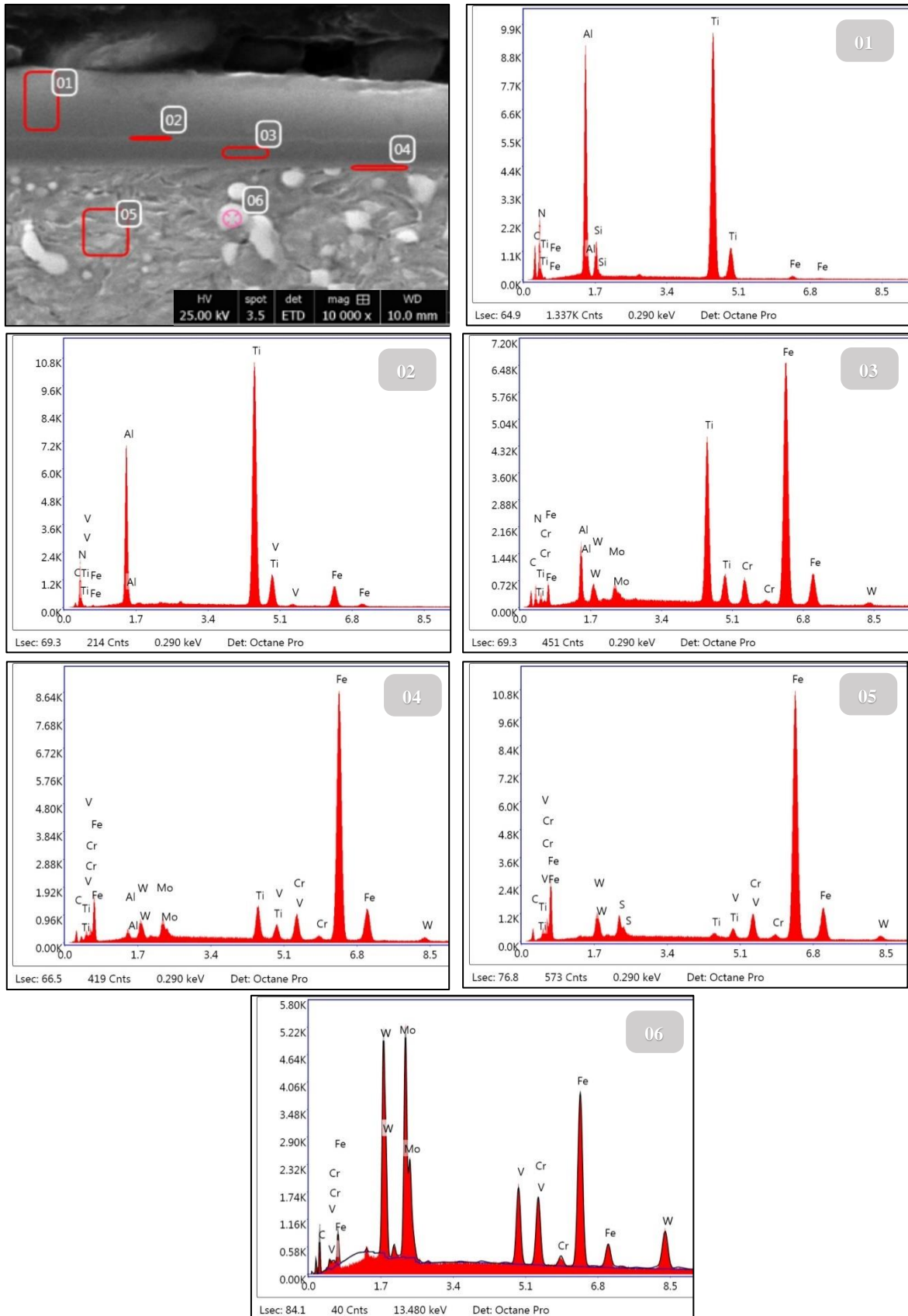


FIGURA 4.5 - Presença elemental no revestimento de TiAl e no substrato (aço rápido ABNT M2)

FONTE - O autor

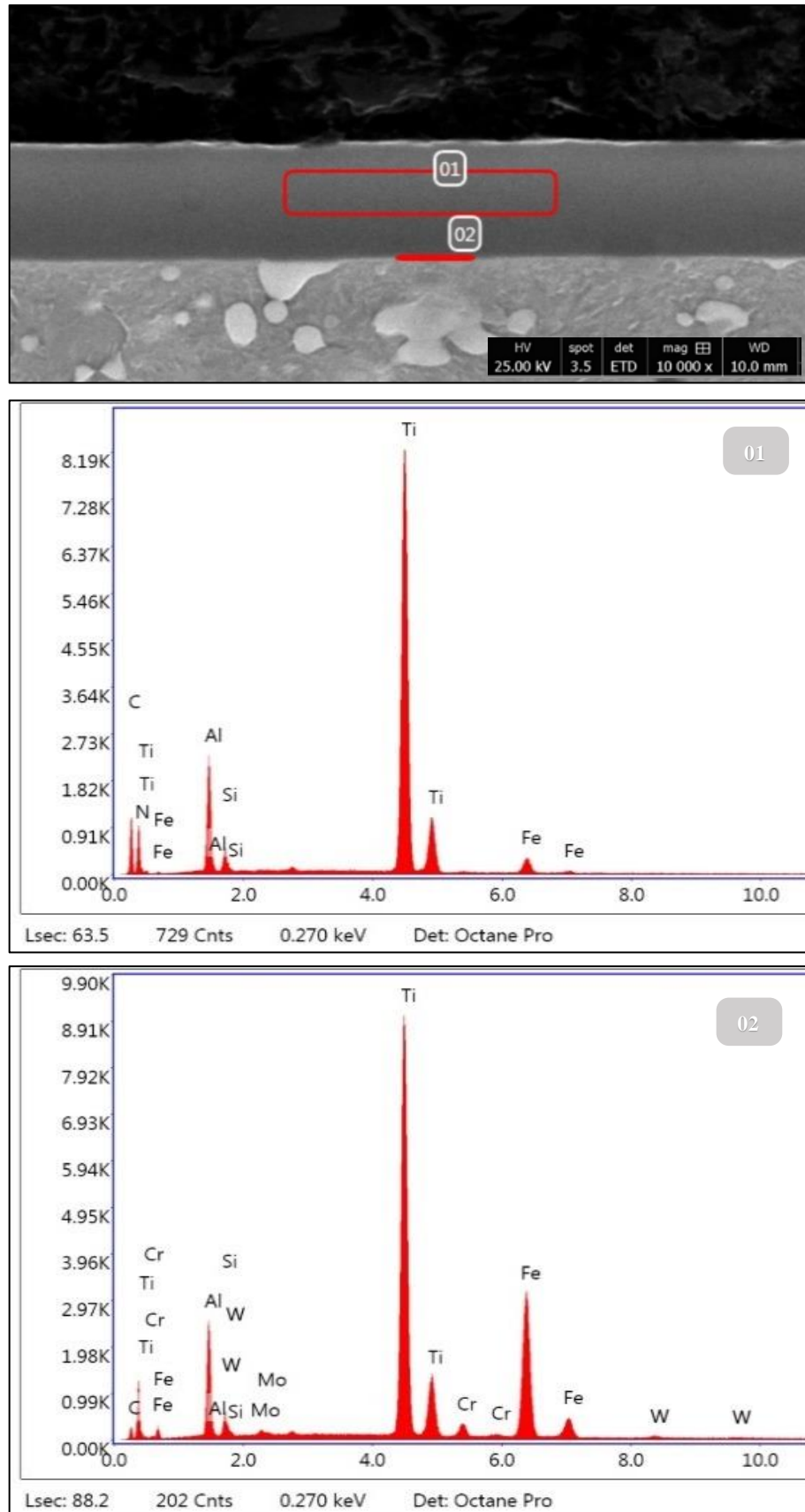


FIGURA 4.6 - Presença elementar no revestimento de TiAl-M

FONTE - O autor

4.2 Rugosidade (Ra)

A rugosidade na superfície de um furo de cada ensaio do arranjo ortogonal L_{16} , sugerido pelo Método Taguchi, foi medida e expressa pelo valor médio dos picos e vales (Ra). O valor médio entre duas medições (Apêndice B) foi utilizado no software Minitab 17 para as análises seguintes.

4.2.1 Razão sinal ruído (S/N) - Ra

O gráfico da FIGURA 4.7 foi construído com o valor das médias de Ra obtidas para cada ensaio, com base em duas amostras. Esses valores encontram-se na TABELA 4.2, juntamente com os valores da razão sinal ruído (S/N) de Taguchi.

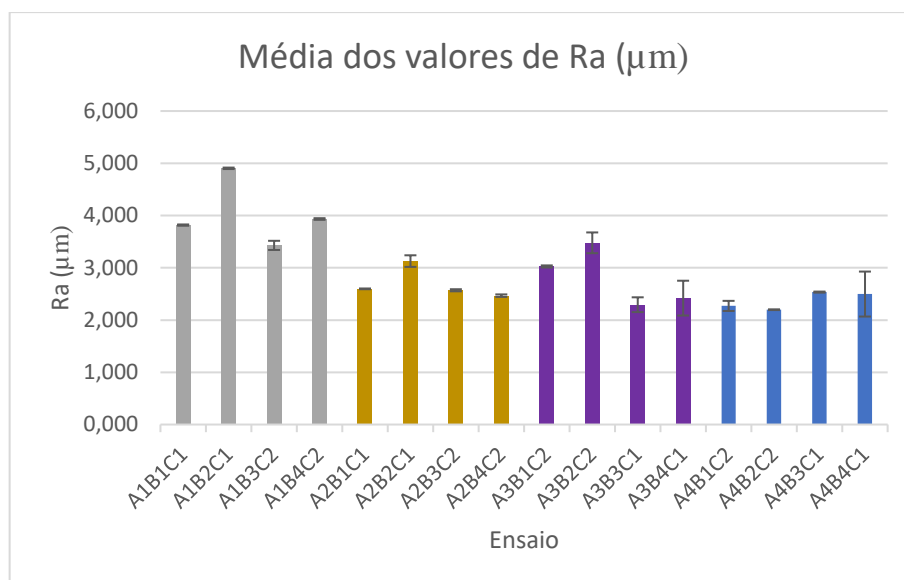


FIGURA 4.7 - Média dos valores medidos de Ra.

FONTE - O autor

Os valores da razão sinal ruído (S/N) para a rugosidade superficial, foram calculados utilizando a EQ. (2.5), menor é melhor, e o valor médio obtido foi de -9,23 dB.

TABELA 4.2 - Valores médios de Ra e razão sinal ruído (S/N) de cada ensaio.

Ensaio	Revestimento	Parâmetros		Resultados	
		Vel. de corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	Ra (μm)	S/N (dB)
A1B1C1	Sem	12	0,10	$3,818 \pm 0,012$	-11,64
A1B2C1	Sem	14	0,10	$4,904 \pm 0,014$	-13,81
A1B3C2	Sem	16	0,12	$3,429 \pm 0,088$	-10,70
A1B4C2	Sem	18	0,12	$3,934 \pm 0,016$	-11,90
A2B1C1	TiN	12	0,10	$2,597 \pm 0,007$	-8,29
A2B2C1	TiN	14	0,10	$3,129 \pm 0,111$	-9,91
A2B3C2	TiN	16	0,12	$2,570 \pm 0,020$	-8,20
A2B4C2	TiN	18	0,12	$2,467 \pm 0,024$	-7,84
A3B1C2	TiNAl	12	0,12	$3,026 \pm 0,020$	-9,62
A3B2C2	TiNAl	14	0,12	$3,479 \pm 0,199$	-10,83
A3B3C1	TiNAl	16	0,10	$2,294 \pm 0,141$	-7,21
A3B4C1	TiNAl	18	0,10	$2,420 \pm 0,333$	-7,67
A4B1C2	TiNAl-M	12	0,12	$2,271 \pm 0,097$	-7,12
A4B2C2	TiNAl-M	14	0,12	$2,198 \pm 0,007$	-6,84
A4B3C1	TiNAl-M	16	0,10	$2,535 \pm 0,010$	-8,08
A4B4C1	TiNAl-M	18	0,10	$2,498 \pm 0,431$	-7,95

FONTE - O autor

A TABELA 4.3 apresenta os valores médios de resposta por nível de cada parâmetro (Apêndice C). Observa-se que a ordem de influência dos fatores na rugosidade superficial foi o seguinte: revestimento, velocidade de corte e o avanço (posto 1, 2 e 3 respectivamente).

TABELA 4.3 - Tabela de resposta de efeitos principais para médias

Nível	Parâmetros		
	A	B	C
1	4,021	2,928	3,024
2	2,691	3,427	2,922
3	2,805	2,707	-
4	2,376	2,830	-
Delta	1,646	0,720	0,103
Posto	1	2	3

FONTE - O autor

A partir destes dados são construídos os gráficos da FIGURA 4.8, que indicam ser a condição que minimiza a rugosidade superficial (Ra), a combinação A4B3C2, ou seja, o revestimento de TiNAl-M, com velocidade de 16 m/min e avanço de 0,12 mm/rev. Estes valores são comprovados pelo gráfico da FIGURA 4.9, efeitos principais para razões S/N, indicando que os respectivos níveis de parâmetros minimizam a razão S/N.

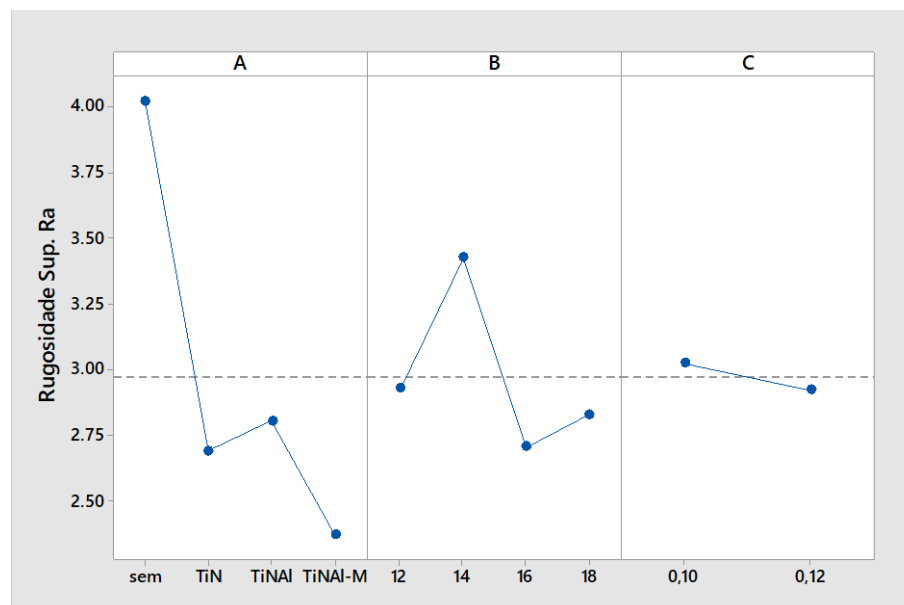


FIGURA 4.8 - Gráfico de efeitos principais para médias (Ra)

FONTE - O autor

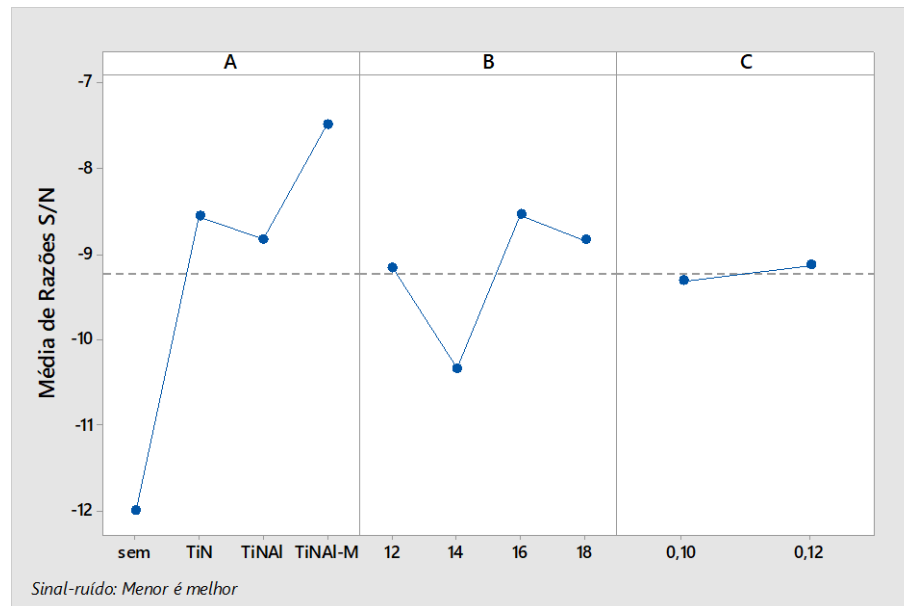


FIGURA 4.9 - Gráfico de efeitos principais para razões S/N (Ra)

FONTE - O autor

Assim como em trabalhos anteriores (OSMAN *et al.*, 2017; TEKAUT *et al.*, 2017) observa-se que as ferramentas revestidas obtiveram menores médias de Ra comparadas aos resultados das ferramentas sem revestimento para os parâmetros de controle analisados. A esse desempenho atribui-se as características dos revestimentos cerâmicos que apresentam elevada dureza, estabilidade química e resistência a oxidação em altas temperaturas (HOLMBERG e MATTHEWS, 2009).

Apesar da broca revestida com TiAl-M ter sido apontada como a de melhor desempenho, as brocas revestidas apresentaram valores próximos de Ra, como pode ser observado no gráfico da FIGURA 4.10. Observa-se por exemplo que, diferentes níveis de velocidade de corte (v_c) e taxa de avanço (f) entre TiN e TiAl-M (A2B3C2, A2B4C2 e A4B3C1, A4B4C1), não produziram variações significativas para os valores de Ra medidos ($2,570 \pm 0,020$, $2,467 \pm 0,024$, $2,535 \pm 0,010$ e $2,498 \pm 0,431$ respectivamente).

Quando comparados, os revestimentos a base de TiN e TiAl, apresentam alternância de melhor desempenho tribológico contra o aço, sendo que aqueles a base de TiAl, no geral, apresentam melhor desempenho em relação a vida útil das ferramentas (HOLMBERG e MATTHEWS, 2009).

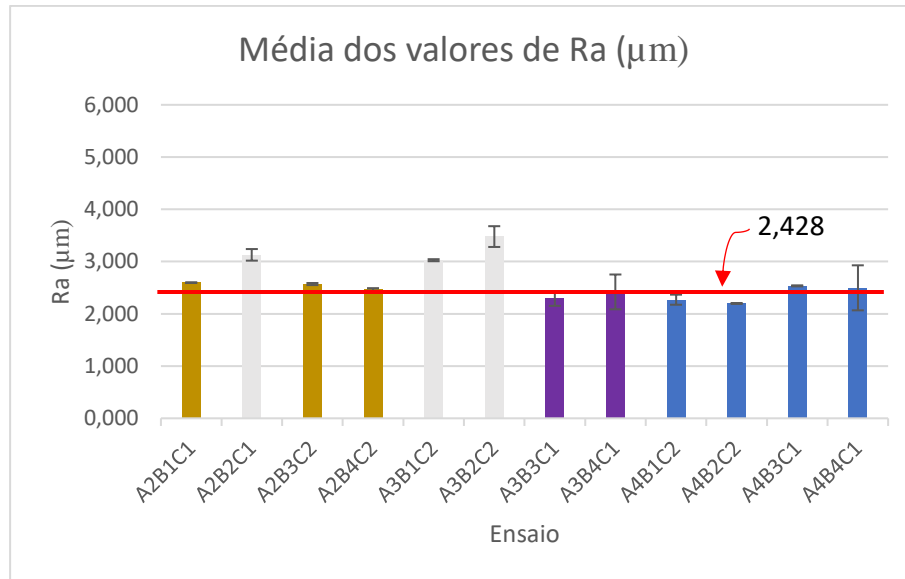


FIGURA 4.10 - Aproximação dos valores de Ra para revestimentos TiN, TiAl e TiAl-M

FONTE - O autor

Os valores de Ra dos ensaios A2B2C1 (TiN, $v_c = 14\text{m/min}$ e $f=0,10\text{ mm/rev}$), A3B1C2 e A3B2C2 (TiAl, $v_c = 12$ e 14 m/min respectivamente e $f = 0,12\text{ mm/rev}$), que estão apagados nos gráfico da FIGURA 4.10, foram significativamente maiores que os demais, o que pode ser justificado pela perda prematura de material na aresta transversal de corte das brocas utilizadas nestes ensaios, como observado nas ampliações das imagens da FIGURA 4.11. Uma vez que avarias nas arestas de corte são fatores impactantes no acabamento superficial, pois dificultam o corte e elevam a força de avanço (vibração). Como também observado nos trabalhos de Motorcu *et al.*, (2014) e Tekaut *et al.*, (2017). A perda de material na aresta transversal das brocas pode ter ocorrido devido a fragilização proveniente da afiação, ou adelgaçamento do núcleo.

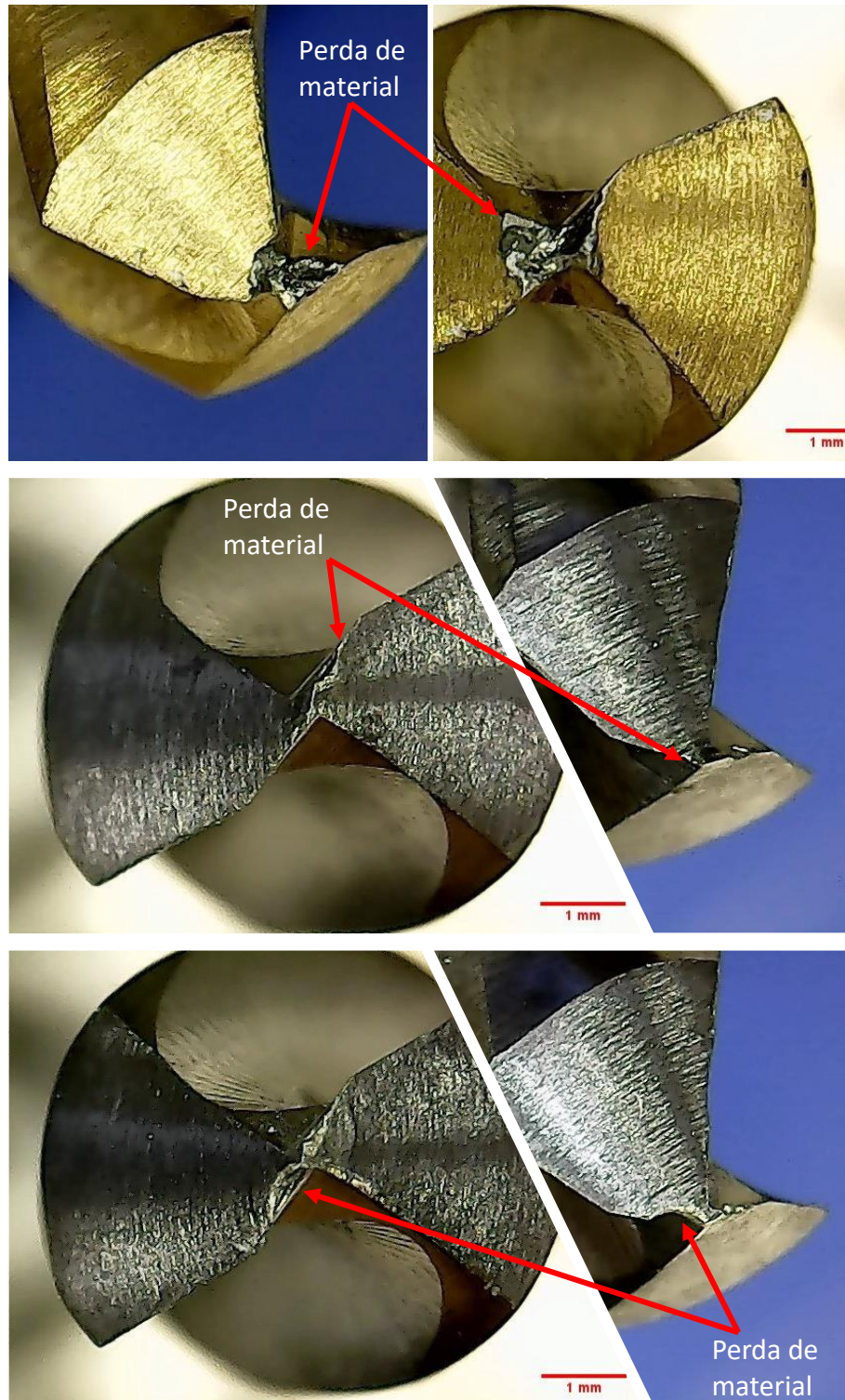


FIGURA 4.11 - Perda de material da aresta transversal das brocas dos ensaios A2B2C1, A3B1C2 e A3B2C2 respectivamente.

FONTE - O autor

Os gráficos de efeitos de Taguchi indicam que as menores velocidades de corte (12 e 14 m/min) apontaram para o aumento da rugosidade. E que o avanço (f), nas condições ensaiadas, foi o parâmetro que menos impactou na rugosidade, nitidamente percebido pela

pequena inclinação da curva C (FIGURA 4.8 e FIGURA 4.9), bem como observado na TABELA 4.3 onde ocupou o posto 3 na ordem de influência. Porém, conforme análise de variância ANOVA do tópico a seguir, tanto a velocidade de corte como o avanço não contribuíram significativamente nos valores de Ra para as condições ensaiadas.

4.2.2 Análise de variância ANOVA

Os resultados da análise variância ANOVA realizada com um nível de confiança de 95% encontram-se resumidos na TABELA 4.4.

TABELA 4.4 - Análise de variância ANOVA para rugosidade superficial (Ra)

Fonte	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	Valor-F	Valor-p	Contribuição %
Revestimento	3	6,255	2,085	13,91	0,002	71,9%
Vel. corte (v_c)	3	1,199	0,400	2,67	0,119	13,8%
Avanço (f)	1	0,042	0,042	0,28	0,610	0,5%
Erro	8	1,199	0,150			13,8%
Total	15	8,694				100%

FONTE - O autor

O cálculo da contribuição é feito conforme a EQ. (4.1) a seguir (OKASHA *et al.*, 2012):

$$\text{Contribuição \%} = \frac{\text{soma dos desvios quadrados}}{\text{soma total dos desvios quadrados}} \quad (4.1)$$

Observa-se que a maior e expressiva contribuição foi do revestimento com 71,9% seguido pela velocidade de corte com 13,8% e com apenas 0,5% para taxa de avanço. Valores estes que convergem com a ordem de influência dos fatores de Taguchi, postos 1, 2, 3 respectivamente da TABELA 4.3. Porém, apenas o revestimento apresenta contribuição significativa para o acabamento superficial (Ra), visto que foi o único que apresentou o valor-p menor que 0,05, conforme intervalo de confiança.

A equação da regressão obtida no Minitab 17, EQ. (4.2), foi utilizada para prever o valor da confirmação dos resultados, visto que a condição que minimiza a rugosidade

superficial (R_a), pelo método Taguchi, foi a combinação A4B3C2, que não foi uma condição ensaiada nos experimentos. O valor encontrado foi uma rugosidade média de $2,059 \pm 0,380 \mu\text{m}$.

$$Ra_p = Ra_m + 1,048A1 - 0,282A2 - 0,168A3 - 0,597A4 - 0,045B1 + 0,454B2 - 0,266B3 - 0,143B4 + 0,051C1 - 0,051C2 \quad (4.2)$$

Onde, Ra_p é o valor de Ra previsto e Ra_m corresponde à média dos valores medidos, que é somado aos coeficientes de cada nível dos fatores.

4.2.3 Confirmação do resultado

A confirmação da combinação de fatores que minimizam o valor de Ra pela metodologia Taguchi, A4B3C2 (broca revestida TiNAl-M, velocidade de corte de 16 m/min e taxa de avanço de 0,12 mm/rev, respectivamente), foi feita primeiramente através da equação da regressão EQ. (4.2), cujo valor encontrado foi Ra_p igual a $2,059 \mu\text{m}$. Em seguida, foi obtido experimentalmente para comparação e confirmação do resultado, conforme TABELA 4.5.

TABELA 4.5 - Confirmação do resultado A4B3C2 Taguchi para Ra

	Menor valor experimentos	Combinação ótima Taguchi	
		Previsto regressão	Experimental
Nível	A4B2C2	A4B3C2	A4B3C2
$Ra (\mu\text{m})$	$2,198 \pm 0,007$	$2,059 \pm 0,380$	$2,209 \pm 0,091$
Erro%		7,3%	

FONTE - O autor

O valor médio obtido na confirmação experimental por meio das quatro medições realizadas ($2,124, 2,135, 2,286$ e $2,289 \mu\text{m}$) foi de $2,209 \pm 0,091 \mu\text{m}$, que considerando o desvio médio ($2,118 \leq \bar{y} \leq 2,30$) contém o menor valor obtido nos experimentos, ensaio A4B2C2, que foi $2,198 \pm 0,007 \mu\text{m}$. O que é coerente, visto que a diferença de parâmetros para estes ensaios é apenas a velocidade de corte (v_c), de B2 para B3, que como visto (TABELA 4.4), não apresentou impacto significativo para os valores de Ra nas condições testadas.

E, o valor experimental apresentou um erro de 7,3% sobre o valor previsto pela regressão ($2,059 \pm 0,380 \mu\text{m}$). Logo o método de Taguchi mostrou se eficiente, nas condições

ensaiadas, para a escolha dos parâmetros de controle avaliados que melhoram o acabamento superficial (redução do Ra) durante a furação do aço ABNT 4340.

4.3 Força de Avanço (F_f)

O segundo parâmetro de qualidade escolhido foi a força de avanço (F_f), cujos valores foram obtidos por meio da medição com dinamômetro piezoelétrico durante os ensaios de furação. A média dos valores máximos da força de avanço (entre o furo e sua réplica) para cada ensaio do arranjo ortogonal L_{16} de Taguchi foram analisados via software Minitab 17.

As curvas da força de avanço (F_f) em função do tempo (s) obtidas para os ensaios foram como a do gráfico da FIGURA 4.12, obtido para o ensaio A1B2C1. Os dados de cada gráfico foram obtidos dos dados gerados pelo dinamômetro e placas de amplificação e aquisição, sendo as variações de tensão registradas pelas placas piezoelétricas, quando estimuladas, convertidas em valores de força em newtons (N).

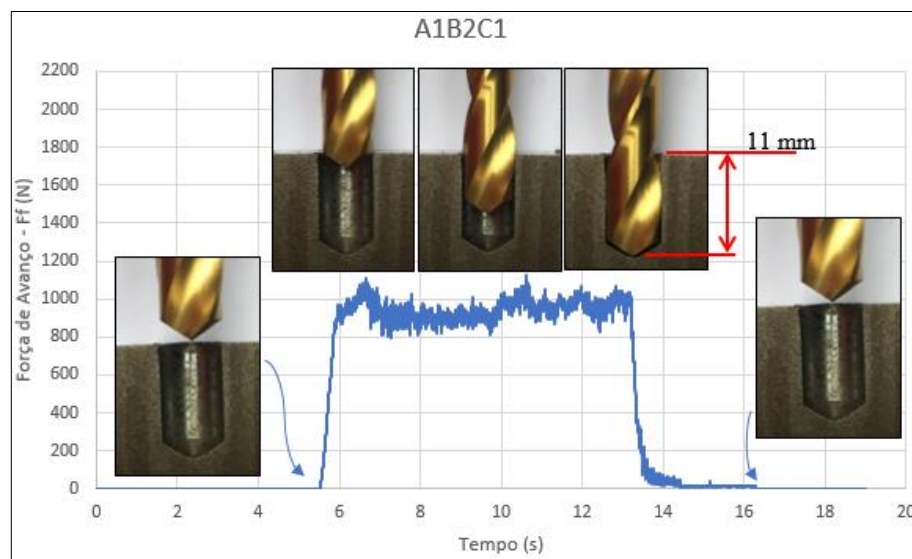


FIGURA 4.12 - Perfil da curva de força de avanço (F_f) pelo tempo (s) durante a furação

FONTE - O autor

O gráfico deste experimento evidencia a brusca elevação da força de avanço (F_f) próximo dos 6 s, correspondendo ao momento em que a broca toca no corpo de prova. Antes desse tempo, correspondente ao movimento de aproximação da broca, não há, portanto, registro significativo de força. Observa-se que a força de avanço durante o período de corte, entre 6 e 13 s aproximadamente, oscilou dentro do patamar de 800 e 1150 N. Porém nem todos os

experimentos apresentaram este comportamento (veja gráficos no Apêndice A). Para a maioria dos ensaios, não houve regime estável, as forças foram aumentando continuamente durante a execução do furo, ou houve alternância de patamares de estabilidade.

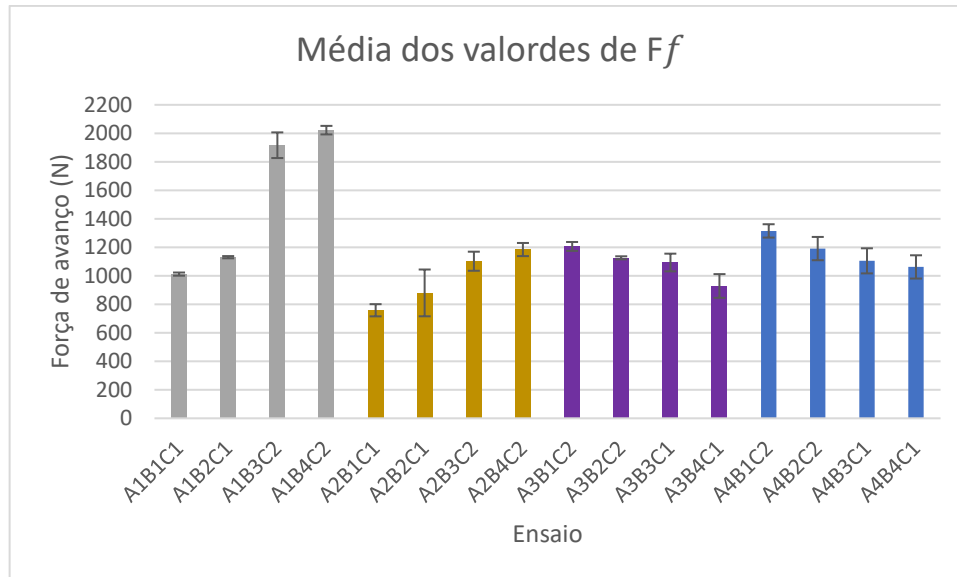
De acordo com Holmberg e Matthews (2009), é possível identificar quatro regimes no fenômeno de desgaste que são comuns para a maioria das condições de contato. O regime inicial, aquele que ocorre no primeiro contato entre duas superfícies, é caracterizado pelo aumento do atrito e do desgaste. Condição em que a ferramenta nova vai acumulando defeitos antes da estabilização. As brocas novas realizando apenas 02 furos, em algumas condições de corte podem ter favorecido este fenômeno, onde foram registradas contínua elevação na força de avanço. Somado ao fato de que a medida que a broca vai aprofundando, aumenta-se o contato entre a broca e a peça e também torna mais dificultosa a remoção dos cavacos.

Observa-se que dos 13 s em diante, depois de ter avançado os 11 mm para dentro da peça, a força de avanço diminui bruscamente, devido a broca não estar mais sendo pressionada contra a peça. Em seguida, o movimento de recuo da ferramenta é iniciado. Em alguns casos, também pode-se perceber a variação na força de avanço durante o recuo da ferramenta, indicando a obstrução no caminho de saída da broca, que pode ser ocasionado pela presença de cavaco por exemplo.

Como nem todos os ensaios apresentaram estabilidade na força de avanço (F_f) para o período registrado, optou-se por utilizar como valor de referência para análise no método de Taguchi a média entre os picos máximos obtidos no ensaio e em sua réplica. Os gráficos de F_f (N) x Tempo (s) de todos os ensaios encontram-se no Apêndice A.

4.3.1 Razão sinal ruído (S/N) - F_f

No gráfico da FIGURA 4.13 encontra-se o valor médio de força de avanço (F_f) com base em duas amostras. Estes valores encontram-se na TABELA 4.6, juntamente com o valor da razão sinal ruído (S/N) de Taguchi, obtidos por meio do software Minitab 17, para cada um dos ensaios realizados. De modo geral a força média de avanço (F_{f_m}) foi de 1192,50 N, sendo o menor valor registrado igual a 758,32 N para o ensaio A2B1C1.

FIGURA 4.13 - Média dos valores medidos de F_f

FONTE - O autor

TABELA 4.6 - Valores médios de F_f e razão sinal ruído (S/N) de cada ensaio.

Ensaio	Parâmetros			Resultados	
	Revestimento	Vel. de corte (m/min)	Taxa avanço (mm/rev)	Força de avanço F_f (N)	S/N (dB)
A1B1C1	Sem	12	0,10	1012,14 ± 11,058	-60,10
A1B2C1	Sem	14	0,10	1130,71 ± 7,716	-61,07
A1B3C2	Sem	16	0,12	1916,57 ± 80,384	-65,65
A1B4C2	Sem	18	0,12	2022,33 ± 29,882	-66,12
A2B1C1	TiN	12	0,10	758,31 ± 42,740	-57,60
A2B2C1	TiN	14	0,10	880,16 ± 164,189	-58,89
A2B3C2	TiN	16	0,12	1102,46 ± 66,874	-60,85
A2B4C2	TiN	18	0,12	1184,45 ± 46,059	-61,47
A3B1C2	TiNAl	12	0,12	1206,28 ± 31,263	-61,63
A3B2C2	TiNAl	14	0,12	1126,27 ± 10,713	-61,03
A3B3C1	TiNAl	16	0,10	1137,41 ± 62,075	-61,12
A3B4C1	TiNAl	18	0,10	928,87 ± 83,102	-59,36
A4B1C2	TiNAl-M	12	0,12	1315,22 ± 43,762	-62,38
A4B2C2	TiNAl-M	14	0,12	1191,14 ± 81,701	-61,52
A4B3C1	TiNAl-M	16	0,10	1105,21 ± 88,000	-60,87
A4B4C1	TiNAl-M	18	0,10	1062,51 ± 81,604	-60,53

FONTE - O autor

Os valores da razão sinal ruído (S/N) para a força de avanço (F_f) foram calculados utilizando a EQ. (2.5), menor é melhor, e o valor médio foi de -61,26 dB.

A TABELA 4.7 apresenta os valores de resposta de efeitos principais para as médias de cada nível dos parâmetros de controle (Apêndice C). Observa-se que a ordem de influência dos fatores na força de avanço (F_f) foi a seguinte: revestimento, taxa de avanço e velocidade de corte (postos 1, 2 e 3 respectivamente).

TABELA 4.7 - Tabela de resposta de efeitos principais para médias

Nível	Parâmetros		
	A	B	C
1	1520,4	1073,0	1001,9
2	981,3	1082,1	1383,1
3	1099,7	1315,4	-
4	1168,5	1299,5	-
Delta	539,1	242,4	381,2
Posto	1	3	2

FONTE - O autor

Com os dados da TABELA 4.7, foram construídos os gráficos da FIGURA 4.14, que indicam ser a condição que minimiza a força de avanço (F_f), o ensaio A2B1C1, ou seja, o revestimento de TiN, com velocidade de corte de 12 m/min e taxa de avanço de 0,10 mm/rev. Estes valores são comprovados pelo gráfico da FIGURA 4.15, efeitos principais para razões S/N, indicando que os respectivos níveis de parâmetros minimizam a razão S/N. Trata-se de uma condição ensaiada, e o valor de força de avanço encontrado foi de $758,31 \pm 42,740$ N, correspondente ao menor valor da TABELA 4.6.

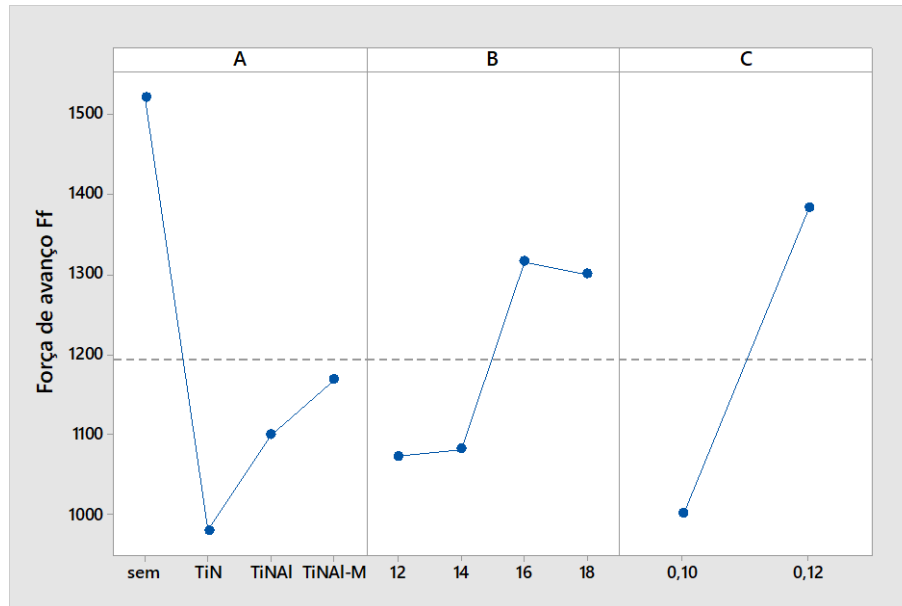


FIGURA 4.14 - Gráfico de efeitos principais para médias (Ff)

FONTE - O autor

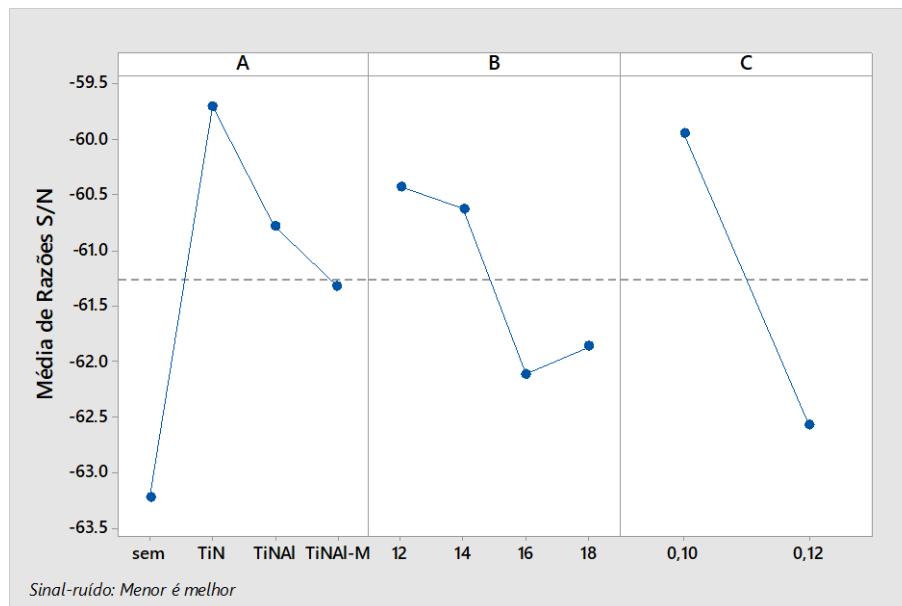


FIGURA 4.15 - Gráfico de efeitos principais para razões S/N (Ff)

FONTE - O autor

Pela análise dos gráficos da FIGURA 4.14 e FIGURA 4.15 percebe-se que entre as ferramentas, aquela revestida com TiN registrou a menor força de avanço (Ff). Seguida pelo revestimento de TiNAl e TiNAl-M. Resultados similares foram encontrados em trabalhos anteriores (PUNEETH e SMITHA, 2017; LIN e SHYU, 2000), onde o revestimento de TiN apresenta melhor desempenho que os revestimentos a base de TiNAl, quanto a força de avanço

(F_f) e vida útil das ferramentas respectivamente. O que pode ser justificado pela característica dos revestimentos a base de TiN, em alguns casos, apresentarem menor coeficiente de atrito comparado àqueles a base de TiAlN contra o aço (HOLMBERG e MATTHEWS, 2009; HUANG *et al.*, 1994).

A velocidade de corte (v_c) pouco influenciou nos resultados para os níveis ensaiados, ocupando o posto 3 na ordem de influência da TABELA 4.7 e fora do nível de significância como mostrado na TABELA 4.8 da análise de variância do tópico a seguir (4.3.2). Porém, pelos gráficos de Taguchi e principalmente no gráfico da figura, percebe-se que para a ferramenta não revestida, o aumento da velocidade de corte tendeu a aumentar a força de avanço. E que para as ferramentas revestidas, não influenciou ou reduziu a força de avanço. Tekaut *et al.*, (2017), obtiveram o mesmo resultado furando aço AISI H13 com ferramentas de metal duro revestidas e não revestidas, justificando pela condição de que quando se eleva a velocidade de corte, as ferramentas não revestidas que possuem afinidade com o material do corpo de prova, têm o processo de desgaste acelerado, elevando a força de avanço. Já com as ferramentas revestidas, que possuem resistência a altas temperaturas, esse efeito não é observado e então ocorre a redução das forças, pois o corte do material e remoção do cavaco são favorecidas. AS ampliações da FIGURA 4.16 evidenciam o desgaste das arestas transversais das brocas de aço rápido ABNT M2. Principalmente no ensaio A1B4C2, que corresponde à maior velocidade (18 m/min).

O avanço (f) em seu nível superior elevou a força de avanço (F_f) (FIGURA 4.14 e FIGURA 4.15). O aumento da força de avanço com a o avanço é um resultado comum em muitos trabalhos com uma diversidade de materiais. Kivac *et al.*, (2012), pelo método de Taguchi também obtiveram este resultado, na furação do aço AISI 316, com brocas de aço rápido AISI M35, revestidas (TiN, TiAlN-N e TiAlN/TiN) e não revestidas. Justificaram que com o aumento do avanço, ocorre o aumento na seção do cavaco a ser removido e a força de avanço também aumenta significativamente. Carvalho *et al.*, (2017), justificaram este resultado encontrado, furando aço inoxidável com brocas de aço rápido, pelo aumento da deformação plástica e encruamento do cavaco no fundo do furo, dificultando ainda mais o corte; furando material compósito, Rezende (2016) e Zitoune *et al.*, (2010), justificaram que para avanços maiores, são necessário maiores esforços, visto que é retirado maior quantidade material por cada revolução da broca.

Pelas ampliações das pontas das brocas percebe-se que as ferramentas de aço rápido ABNT M2 sem revestimento (FIGURA 4.16) tiveram maior avaria na aresta transversal comparado às revestidas, justificando a maior sensibilidade destas ferramentas ao aumento da

taxa de avanço nos resultados de força de avanço, conforme gráficos da FIGURA 4.13, FIGURA 4.14 e FIGURA 4.15. Uma vez que a aresta transversal de corte nas brocas é responsável por 50 a 60% da força de avanço em operações de furação (ASTAKHOV, 2014).

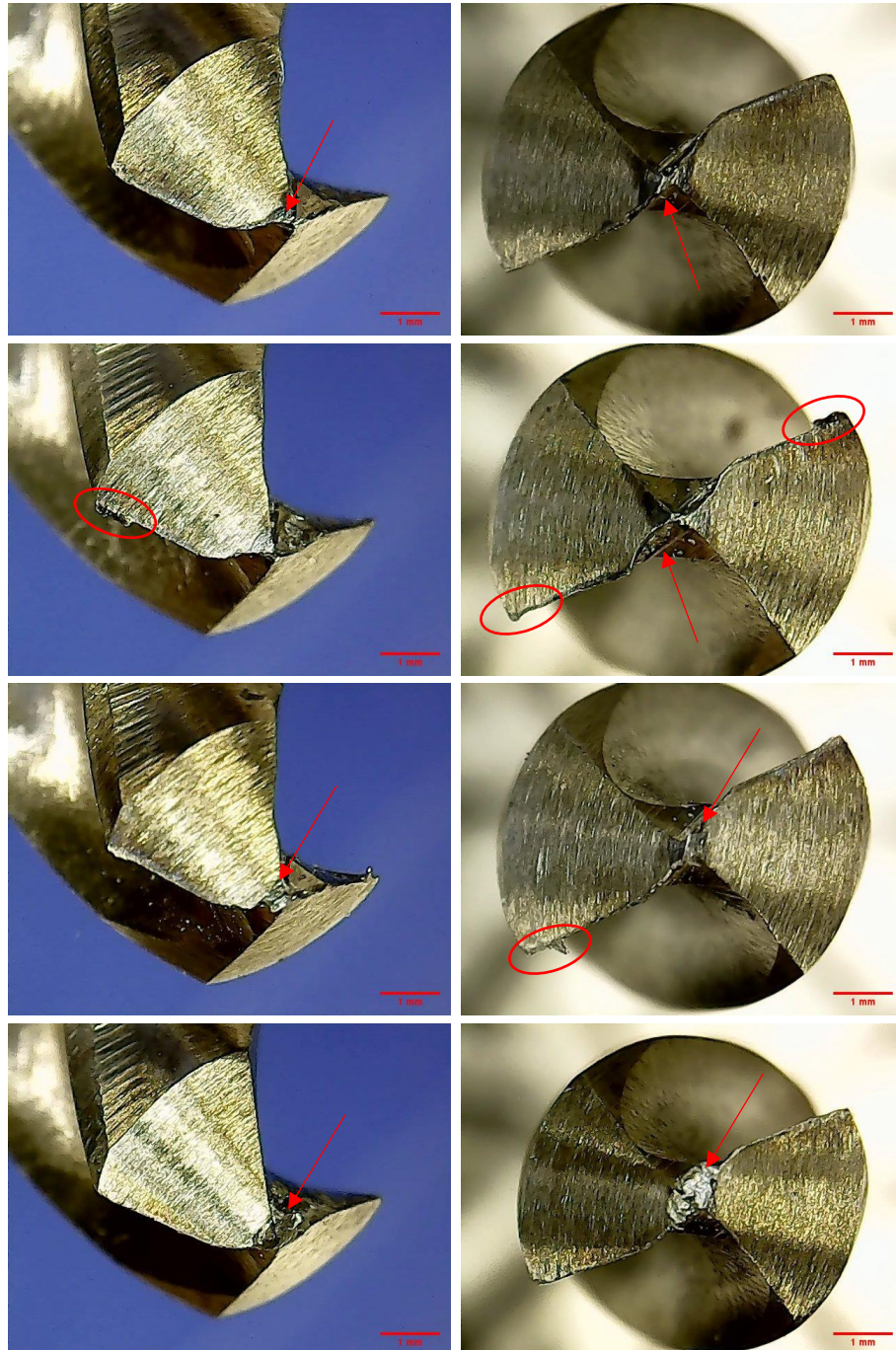


FIGURA 4.16 - Ampliação das brocas aço rápido ABNT M2, ensaios A1B1C1, A1B2C1, A1B3C2 e A1B4C2 respectivamente.

FONTE - O autor

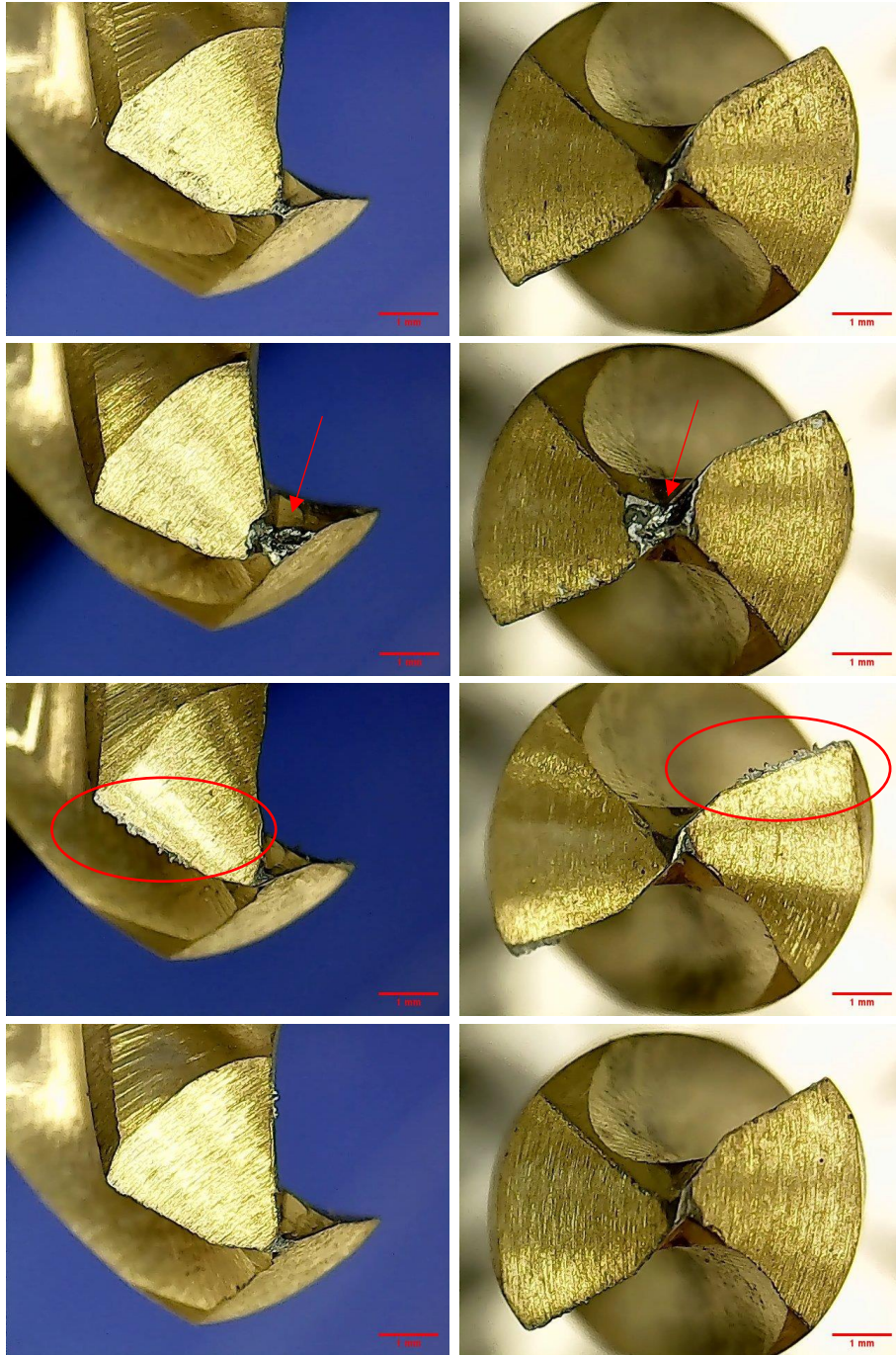


FIGURA 4.17 - Ampliação das brocas revestidas com TiN, ensaios A2B1C1, A2B2C1, A2B3C2 e A2B4C2 respectivamente.

FONTE - O autor

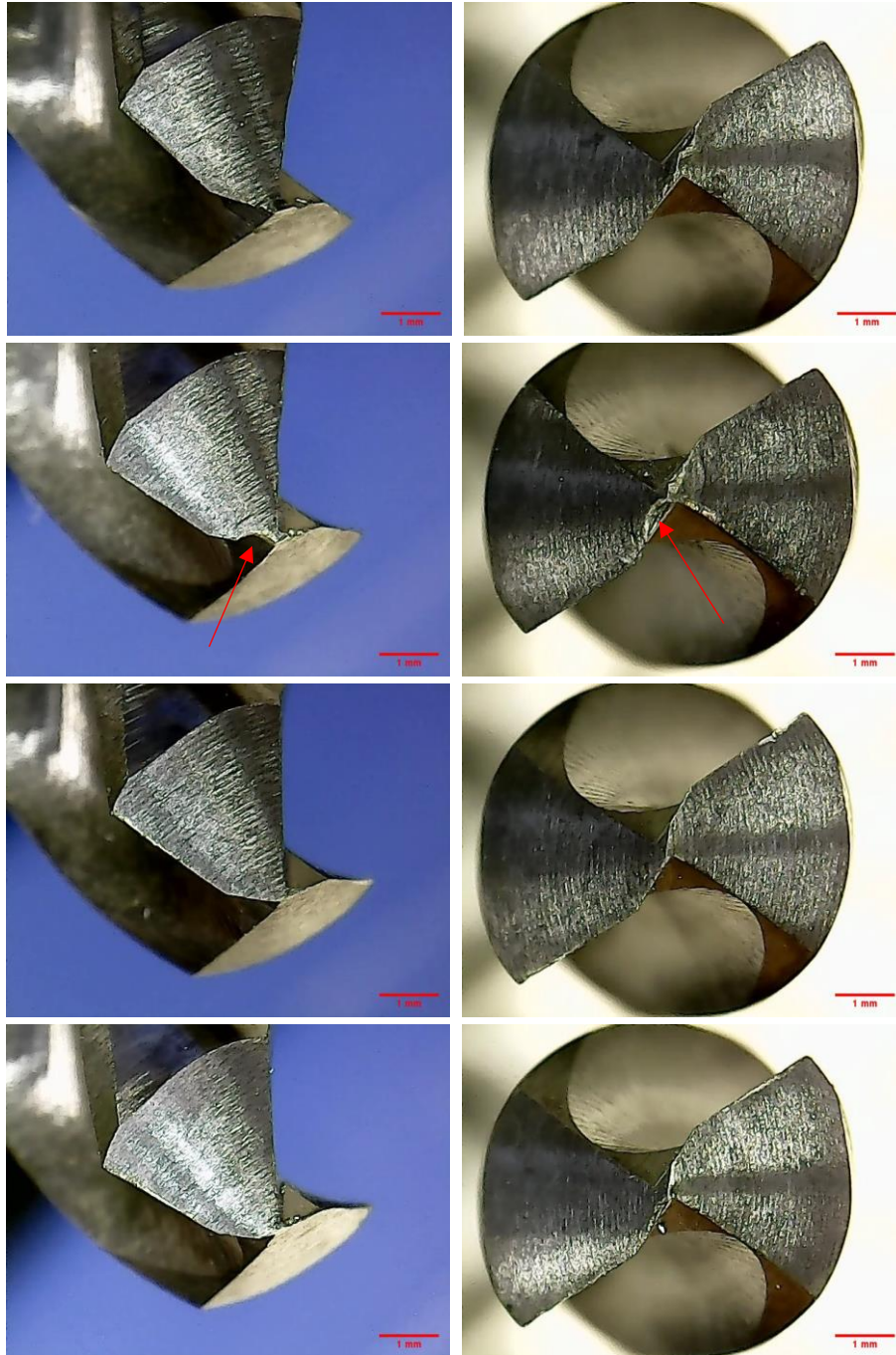


FIGURA 4.18 - Ampliação das brocas revestidas com TiNAl, ensaios A3B1C2, A3B2C2, A3B3C1 e A3B4C1 respectivamente.

FONTE - O autor

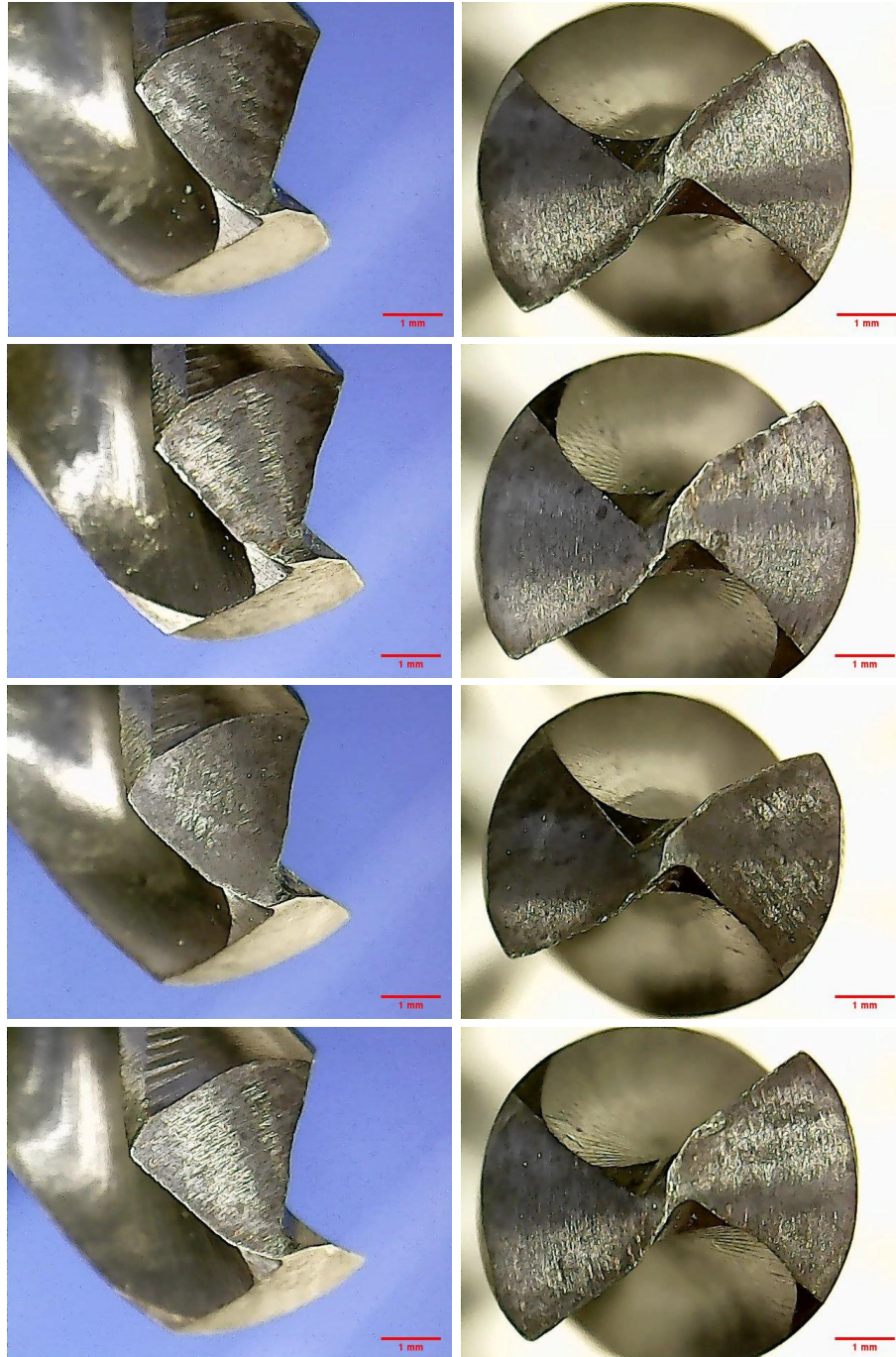


FIGURA 4.19 - Ampliação das brocas revestidas com TiAl-M ensaios A4B1C2, A4B2C2, A4B3C1 e A4B4C1 respectivamente.

FONTE - O autor

4.3.2 Análise de variância ANOVA

Os resultados da análise de variância ANOVA realizada a um nível de confiança de 95% encontram-se resumidos na TABELA 4.8.

TABELA 4.8 - Análise de variância ANOVA para força de avanço (F_f)

Fonte	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	Valor-F	Valor-p	Contribuição %
Revestimento	3	645260	215087	7,77	0.009	38.9%
Vel. corte (v_c)	3	212171	70724	2,55	0.129	12.8%
Avanço (f)	1	581173	581173	20,98	0.002	35.0%
Erro	8	221569	27696			13.3%
Total	15	1660174				100.0%

FONTE - O autor

O cálculo da contribuição foi feito conforme equação EQ. (4.1). As contribuições para força de avanço (F_f) foram de 38,9% do revestimento, seguido do avanço (f) com 35,0% e da velocidade de corte com 12,8%. Porém a velocidade de corte não contribuiu significativamente, visto que apresentou valor-p maior que 0,05 na TABELA 4.8.

Em seguida foi obtida, no software Minitab 17, a equação da regressão para o experimento, EQ. (4.3).

$$Ff_p = Ff_m + 1192,5A1 - 211,2A2 - 92,8A3 - 24,0A4 - 119,5B1 - 110,4B2 + 122,9B3 + 107,0B4 - 190,6C1 + 190,6C2 \quad (4.3)$$

Onde Ff_p é a força de avanço prevista e Ff_m representa a força de avanço média obtida nos ensaios, que é somada aos coeficientes obtidos para cada nível dos fatores de controle.

Na escolha dos fatores que minimizam a força de avanço (F_f) pela metodologia Taguchi, não foi necessário realizar a confirmação do resultado, visto que a melhor combinação dos parâmetros analisados, A2B1C1, foi obtida numa condição ensaiada.

Por meio da equação da regressão EQ. (4.3), para a condição que minimizou a força de avanço, obteve-se Ff_p igual a $671,20 \pm 166,42$ N. Cujo desvio médio ($504,79 \leq \bar{y} \leq 837,62$), contém o menor valor ensaiado, $758,31 \pm 42,74$ N (TABELA 4.6), sendo o erro de 13,0% sobre o valor previsto (Ff_p). Logo o método de Taguchi mostrou-se eficiente para a indicação, dentro dos parâmetros de controle avaliados, da condição que minimiza a força de avanço (F_f) na furação do aço ABNT 4340.

5 CONCLUSÃO

Com a realização deste trabalho que objetivou identificar por meio da técnica de Taguchi os níveis dos parâmetros de entrada (revestimento, velocidade corte e taxa de avanço) que minimizam os valores de rugosidade (R_a) na superfície dos furos e a menor força de avanço (F_f) durante a furação do aço ABNT 4340, pode se concluir que:

- Os objetivos foram alcançados visto que o método de Taguchi aplicado apontou para a combinação dos níveis de parâmetros que registraram o menor valor de R_a e força de avanço (F_f).
- Os revestimentos a base de TiN, TiNAl e TiNAl-M aplicados nas brocas de aço rápido ABNT M2 desempenharam um papel muito importante na furação do aço ABNT 4340, pois tanto para o acabamento superficial (R_a) como para força de avanço (F_f) as brocas quando revestidas levaram aos menores valores desses parâmetros.
- Nos testes realizados, os revestimentos tiveram desempenho semelhante quanto o acabamento superficial (R_a). Ou seja, os três revestimentos, enquanto íntegros, apresentaram acabamento superficial semelhante para a superfície dos furos realizados.
- A perda prematura de material na aresta transversal de corte das brocas, prejudicaram o acabamento superficial dos furos.
- A presença do revestimento foi o parâmetro de contribuição majoritária nos resultados de acabamento superficial (R_a), como indicado pelo método Taguchi, onde ocupou o primeiro posto na ordem de influência e também pela análise de variância ANOVA a um nível de confiança de 95%, apresentando 71,9% de contribuição. Enquanto que força de avanço e velocidade de corte não contribuíram significativamente.
- Os revestimentos a base de TiN e TiNAl apresentam alternância de desempenho tribológico, e que o menor coeficiente de atrito do TiN contra o aço, nesse caso, pode ter sido o motivo da menor força de avanço ter sido alcançada com este revestimento na furação do aço ABNT 4340.
- A presença do revestimento e o avanço (f) tiveram contribuições praticamente iguais nos resultados de força de avanço. A velocidade de corte não contribuiu significativamente, ocupando o posto 3 na ordem de influência do método de Taguchi e apenas 5% de contribuição pela análise de variância ANOVA.

- O desgaste de núcleo, ou da aresta transversal foi predominante nas brocas sem revestimento, e estas foram mais sensíveis às variações da taxa de avanço nos resultados de força de avanço.
- A confirmação experimental dos resultados para a condição que minimiza os valores de Ra foram positivas e confirmaram a eficiência da metodologia Taguchi. Para a força de avanço não foi necessário a confirmação experimental.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho mostrou que a metodologia Taguchi foi eficiente em otimizar parâmetros na furação do aço ABNT 4340 utilizando brocas de aço rápido ABNT M2 revestidas por PVD e não revestidas, a fim de se reduzir a rugosidade (R_a) na superfície dos furos realizados e também a força de avanço (F_f) durante a operação de furação. Para trabalhos futuros são apresentadas as seguintes sugestões:

- Realizar o teste de vida das ferramentas, a fim de comparar se aquela condição apontada como a de menor força de avanço (F_f) se traduziu em maior vida útil da broca verificando assim o alcance da metodologia.
- Avaliar a rugosidade superficial (R_a) a fim de verificar se a condição ótima apontada pela metodologia Taguchi também se mantém ao longo da vida da ferramenta.
- Avaliar o efeito da variação do material do substrato das brocas (ex.: metal duro).
- Utilizar fluido de corte.

ABSTRACT

In this work, the Taguchi methodology was applied to identify the input parameter levels (coating, cutting speed and feed rate) that generate the best results in the output parameters: feed force (F_f) and surface finish (R_a), during drilling of steel ABNT 4340. For this, 16 + 16 dry holes were made in samples prepared from ABNT 4340 steel, following the L16 orthogonal array suggested by the Taguchi methodology in a CNC vertical machining center. Tools used were ABNT M2 HSS drills, with 6 mm diameter, DIN 338 standard, coated by PVD technique and uncoated. Tools (coated and uncoated), the cutting speed (v_c) and feed rate (f) were selected as control parameters. The mean roughness values of the finished holes surfaces were measured using a surface roughness tester. The mean values of feed force were obtained during the drilling tests by piezoelectric dynamometer assembled in the machining center. The data were analyzed in Minitab 17 software configured for Taguchi's "smaller is better" function. Analysis of variance ANOVA was used to determine the control factors that most affect the surface finish (R_a) and the thrust force (F_f). TiN, TiNAI and TiNAI-M (multilayer) coated drills were analyzed by MEV and the mean layer thicknesses observed were 2.752, 3.545 and 3.340 μm respectively. For the surface finishing (R_a) the coatings were the most impacting factors (71.9%) for the reduction of this parameter. Although the TiNAI-M coating was indicated by the Taguchi methodology as the best performance, the coatings obtained close results. The cutting speed (v_c) and the feed rate (f) did not present a significant contribution in the tested conditions (13.8% and 0.5%, respectively). For the thrust force (F_f), the coating presence was as impacting as the feed rate (38.9% and 35.0% respectively) and the cutting speed (12.8%) did not show a significant contribution. The TiN-based coating was indicated by the Taguchi methodology as the one with the best performance, with the lowest feed rate (f) and the lowest cutting speed (v_c) for the reduction of the feed force (F_f). Confirmation of the results was necessary only for the surface roughness (R_a), which together obtained results for F_f , proved the efficiency of the Taguchi methodology.

Keywords: Taguchi; drilling; R_a ; thrust force; coatings; TiN; TiNAI.

REFERÊNCIAS

1. ABNT. **NBR 6163 - Conceitos da técnica de usinagem: geometria da cunha cortante: terminologia.** São Paulo. 1980.
2. ABNT. **NBR 6162 - Movimentos e relações geométricas na usinagem dos metais: terminologia.** São Paulo. 1989.
3. ABNT. **NBR 6006 - Classificação por composição química de aços para construção mecânica.** São Paulo. 1994.
4. ABNT. **NBR ISO 4287 - Especificações Geométricas do Produto (GPS) - Rugosidade: Método do Perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.** São Paulo. 2002.
5. ADOBERG, E. et al. The effect of surface pre-treatment and coating post-treatment to the properties of TiN coatings. **Estonian Journal of Engineering**, v. 18, n. 3, p. 185-192, Janeiro 2012.
6. AL-BUKHAITI, M. A. et al. Tribological and mechanical properties of Ti/TiAlN/TiAlCN nanoscale multilayer PVD coatings deposited on AISI H11 hot work tool steel. **Applied Surface Science**, v. 318, p. 180-190, 1 November 2014.
7. ANKALAGI, S.; GAITONDE, V.; PETKAR, P. Experimental studies on hole quality in drilling of SA182 steel. **ScienceDirect**, v. 4, p. 11201-11209, 2017.
8. ASTAKHOV, V. P. **Drills science and technology of advanced operations.** New York: CRC Press, 2014.
9. ATKINS, A. G. Slice–push, formation of grooves and the scale effect in cutting. **Interface focus**, v. 6, n. 3, p. 20160019, 2016.
10. BEAKE, B. et al. Investigating the correlation between nanoimpact fracture resistance and hardness/modulus ratio from nanoindentation at 25 – 500 °C and the fracture resistance and lifetime of cutting tools with Ti $1 - x$ Al x N ($x = 0.5$ and 0.67) PVD coatings in milli. **Surface and Coatings Technology**, v. 8, n. 201, p. 4585-4593, 2007.

11. BIKSA, A. et al. Wear behavior of adaptive nano-multilayered AlTiN/MexN PVD coatings during machining of aerospace alloys. **Tribology International**, v. 43, n. 8, p. 1491-1499, 2010.
12. BRAIC, V. et al. TiAlN/TiAlZrN multilayered hard coatings for enhanced performance of HSS drilling tools. **Surface and Coatings Technology**, v. 204, n. 12–13, p. 1925-1928, 2010.
13. CARDOSO, A. S. M. **Caracterização mecânica e microestrutural dos aços SAE 4340 e 300M após soldagem a laser e tratamento superficial de nitretação a plasma**. Dissertação (Mestrado em Ciências) Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo. Lorena, p. 112. 2011.
14. CARVALHO, A. C. et al. Investigação da qualidade do furo gerado na furação de chapa de aço inoxidável AISI 304. **9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Joinville, Junho 2017.
15. CASTILLO, G. J. W. **Furação profunda de ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal duro com canais retos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, SC, p. 134. 2005.
16. ÇELİK, Y. H. Investigating the Effects of Cutting Parameters on the Hole quality in Drilling the Ti-6Al-4V alloy. **Materials and Technology**, v. 48, n. 5, p. 653-659, 2014.
17. DARSIN, M.; PASANG, T.; CHEN, Z. **Performance of TiAlN PVD Coated Carbide Drill when Drilling Titanium 6246 Alloy**. MATEC Web of Conferences. [S.l.]: EDP Sciences. 2017. p. 02001.
18. FOX-RABINOVICH, G. et al. Design and performance of AlTiN and TiAlCrN PVD coatings for machining of hard to cut materials. **Surface and Coatings Technology**, v. 4, n. 204, p. 489-496, 2009.
19. FOX-RABINOVICH, G. et al. Spatio-temporal behaviour of atomic-scale tribo-ceramic films in adaptive surface engineered nano-materials. **Scientific Reports**, v. 5, p. 7, 2015.
20. GERTH, J.; WIKLUND, U. The influence of metallic interlayers on the adhesion of PVD TiN coatings on high-speed steel. **Wear**, v. 264, p. 885-892, 2008.

21. GINTING, A. et al. The characteristics of CVD-and PVD-coated carbide tools in hard turning of AISI 4340. **Measurement**, v. 129, p. 548-557, 2018.
22. GÜHRING. Ferramentas para furar, 2016. Disponível em: <https://www.guhring.com.br/uploads/Furacao_2016.pdf>. Acesso em: 24 Março 2019.
23. HARBER, R. H. et al. A classic solution for the control of a high-performance drilling. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 47, p. 46-49, 2007.
24. HOLMBERG, K.; MATTHEWS, A. **Coating tribology**. 2ª. ed. Amsterdam: Elsevier Science, v. 56, 2009.
25. HOVSEPIAN, P. E.; LEWIS, D. B.; MUNZ, W. -D. Recent progress in large scale manufacturing of multilayer/superlattice hard coatings. **Surface and Coatings Technology**, v. 133-134, p. 166-175, November 2000.
26. HUANG, Z.; SUN, Y.; BELL, T. Friction behaviour of TiN, CrN and (TiAl)N coatings. **Wear**, v. 173, p. 13-20, Abril 1994.
27. IRWIN. Brocas para metal. **Irwin Ferramentas**, 2017. Disponível em: <https://www.irwin.com.br/uploads/documents/221_dicas_brocas_metal.pdf>. Acesso em: 13 Fevereiro 2018.
28. JESUS, E. R. B. **Ferramentas de usinagem em aço rápido AISI M2 obtido por conformação por spray**. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 207. 2004.
29. KIVAK, T.; SAMTAS, G.; CICEK, A. Taguchi method based optimisation of drilling parameters in drilling of AISI 316 steel with PVD monolayer coated HSS drills. **Measurement**, v. 45, n. 6, p. 1547-1557, March 2012.
30. KLOCKE, F. **Manufacturing process 1: Cutting**. Berlin: Springer, 2011.
31. KURT, M.; BAGCI, E.; KAYNAK, Y. Application of Taguchi methods in the optimization of cutting parameters for surface fin. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 40, n. 5-6, p. 458-469, 2009.
32. KYRATISIS, P. et al. Prediction of thrust force and cutting torque in drilling based on the response surface methodology. **Machines**, v. 6, n. 24, p. 12, Junho 2018.

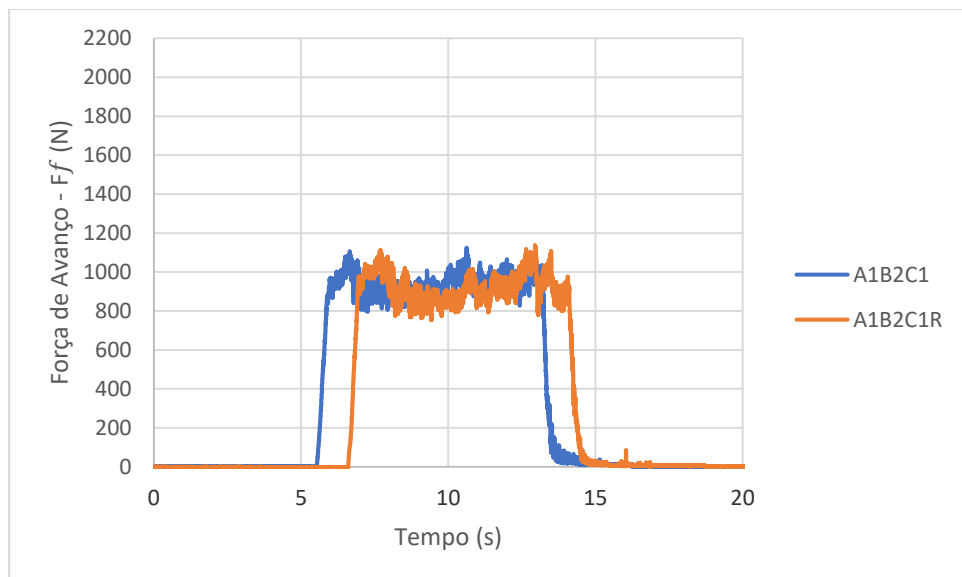
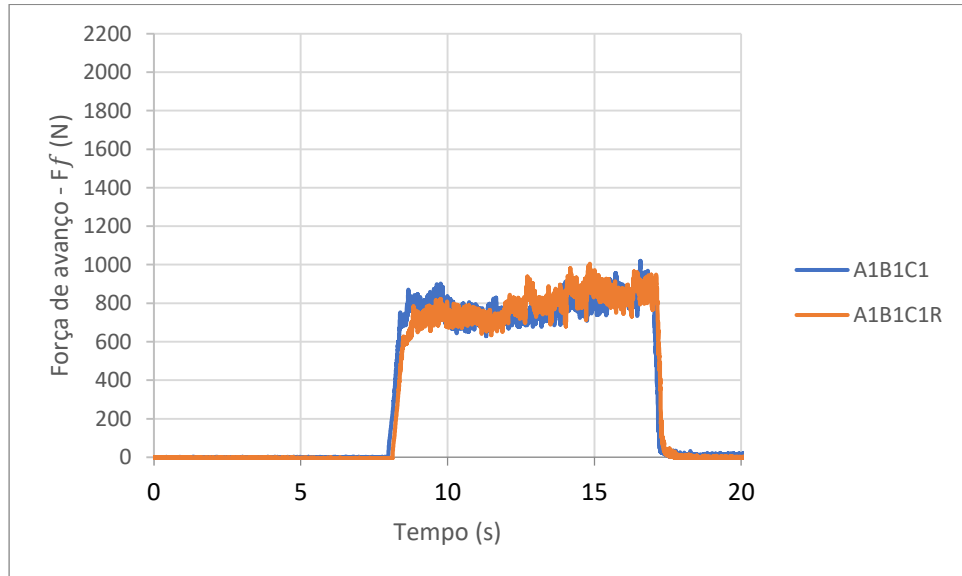
33. LEYENDECKER, T. et al. The development of the PVD coating TiAlN as a commercial coating for cutting tools. **Surface and Coatings Technology**, v. 48, n. 2, p. 175-178, 1991.
34. LIN, T.; SHYU, R. Improvement of tool life and exit burr using variable feeds. **Advanced Manufacturing Technology**, v. 16, p. 308-313, 2000.
35. MACHADO, Á. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 3^a. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2015.
36. MATTHEWS, A. Titanium nitride PVD coating technology. **Surface Engineering**, v. 1, n. 2, p. 93-104, 1985.
37. MERAL, G. et al. Multi-response Optimization of Cutting Parameters for Hole Quality in Drilling of AISI 1050 Steel. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 40, n. 12, p. 3709-3722, 2015.
38. MITSUBISHI. Mitsubishi Materials, 2012. Disponível em: <http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/cutting_tool.html>. Acesso em: 04 Junho 2017.
39. MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 8^a. ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 2012.
40. MOTORCU, A. R.; ABDIL, K.; ISMAIL, D. The evaluation of the effects of control factors on surface roughness in the drilling of Waspaloy superalloy.. **Measurement**, v. 58, p. 394-408, 2014.
41. NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos**. 2^a. ed. Campinas: Unicamp, 2001.
42. OERLIKON BALZERS. Processos à base de PVD, 2018. Disponível em: <<https://www.oerlikon.com/balzers/br/pt-br/portfolio/tecnologias-de-superficie/processos-a-base-de-pvd/>>. Acesso em: 12 Julho 2018.
43. OKASHA, M. et al. Mechanical microdrilling of negative-tapered laser-predrilled holes: a new approach for burr minimization. **Int J Adv Manuf Technol**, n. 61, p. 213-225, 2012.

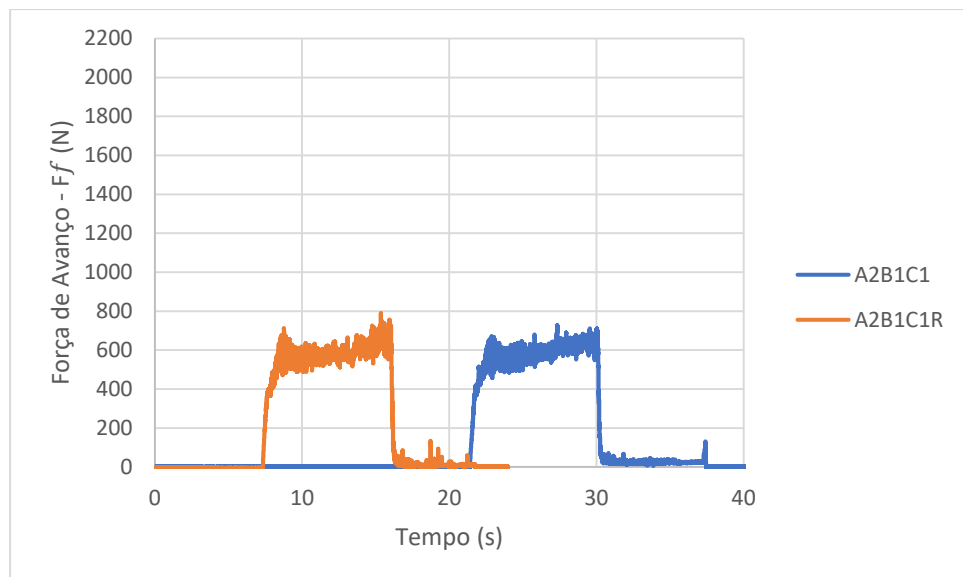
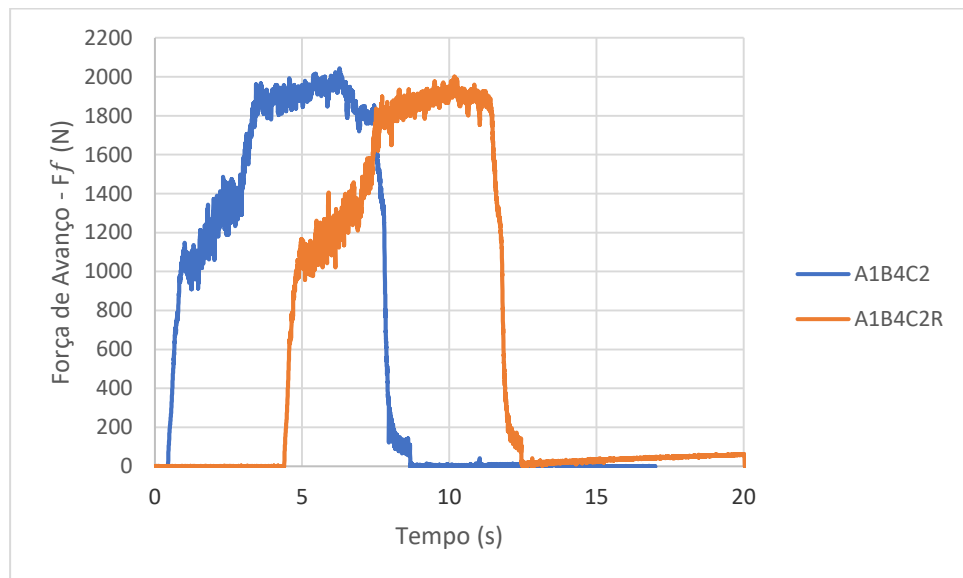
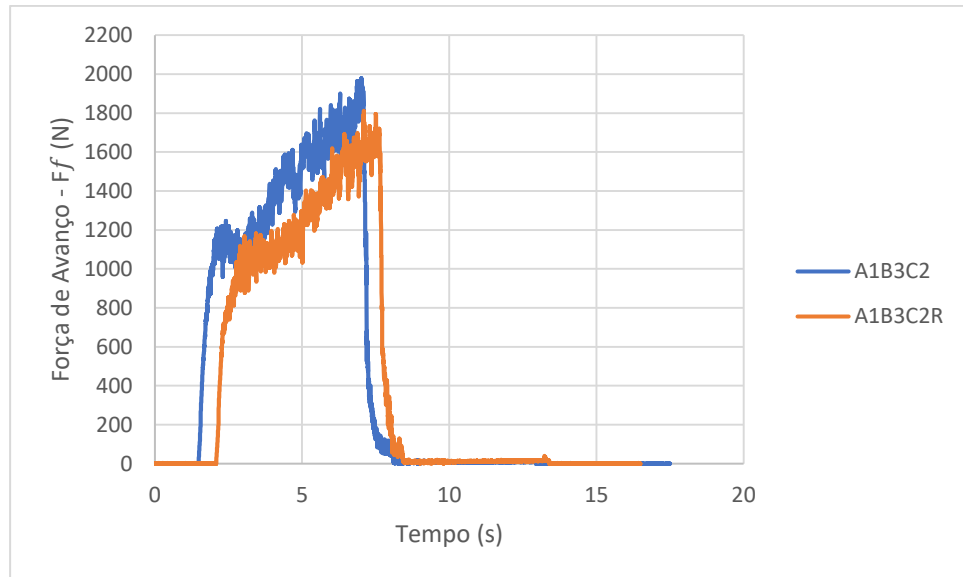
44. OSMAN, M. H. et al. Optimization of Drilling Parameters on Diameter Accuracy in Dry Drilling. **International Journal of Applied Engineering Research**, v. 12, p. 9644-9652, Novembro 2017.
45. PHADKE, M. S. **Quality engineering using robust design**. USA: Prentice-Hall, 1989.
46. PUNEETH, H.; SMITHA, B. Studies on tool life and cutting forces for drilling operation using. **IRJET**, v. 04, p. 1949-1954, 2017.
47. RAMACHANDRAN, K. M.; TSOKOS, C. P. **Mathematical statistics with applications in R**. London: Elsevier, 2014.
48. RAMESH, V.; MOHAMMED, H. V.; GOPINATH, T. Taguchi method based optimization of drilling parameters of EN31 steel with PVD coated. **Journal of Manufacturing Engineering**, v. 10, n. 2, p. 112-116, 2015.
49. REZENDE, B. **Estudo da furação de um material compósito tipo sanduiche**. Dissertação de mestrado, UFMG. Belo Horizonte, p. 110. 2016.
50. SHARMA, K.; JATAV, A. Optimization of machining parameters in drilling of stainless steel. **International Journal of Scientific Research Engineering & Technology**, v. 4, n. 8, p. 902-908, Agosto 2015.
51. SHARMA, K.; JATAV, A. Optimization of Machining Parameters in Drilling of Stainless steel. **International Journal of Scientific**, v. 4, n. 8, p. 902-908, 2015.
52. SHTANSKY, D. V.; LEVASHOV, E. A.; SUKHORUKOVA, I. V. Multifunctional bioactive nanostructured films. In: MUCALO, M. **Hydroxyapatite (HAp) for biomedical applications**. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2015. Cap. 8, p. 159-188.
53. SIDDIQUEE, A. N. et al. Optimization of deep drilling process parameters of AISI 321 steel using Taguchi method. **Procedia materials science**, v. 6, p. 1217-1225, 2014.
54. SOUZA, A. J.; MATTES, F. B.; MOGNAGA, G. F. Análises dos esforços de corte gerados na furação de ferro fundido DIN GGG50 para brocas de metal duro com diferentes microgeometrias. **Anais do VIII Congresso nacional de engenharia mecânica**, Uberlândia, Agosto 2014.

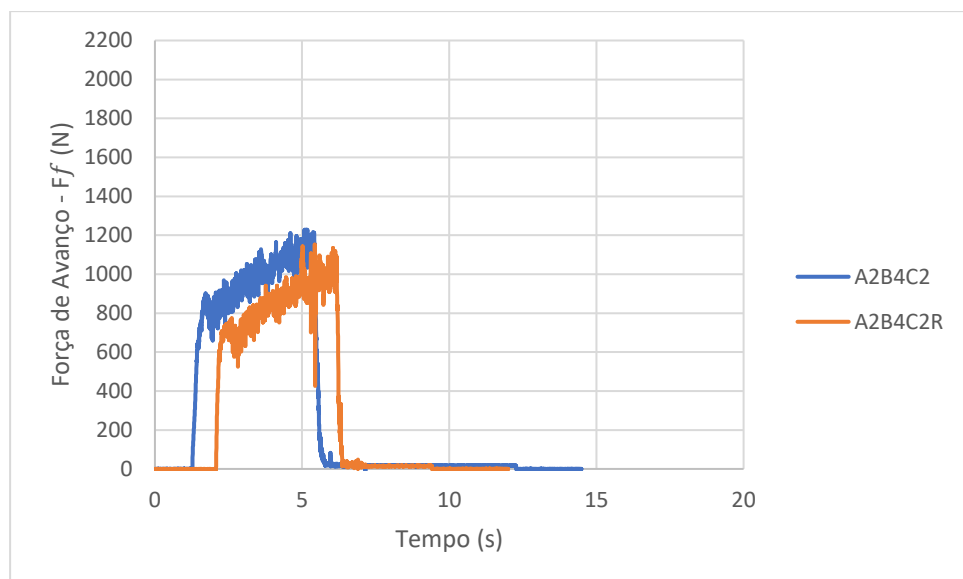
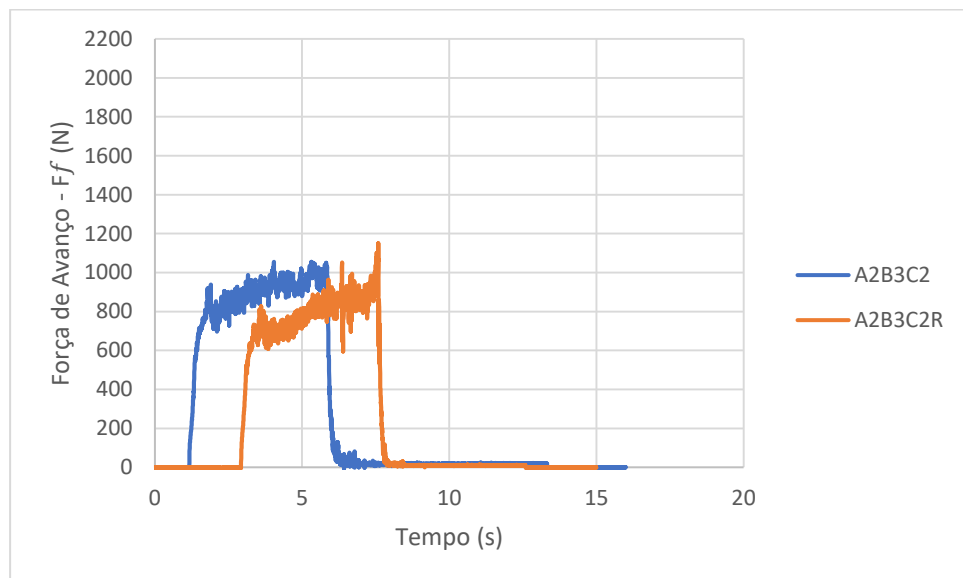
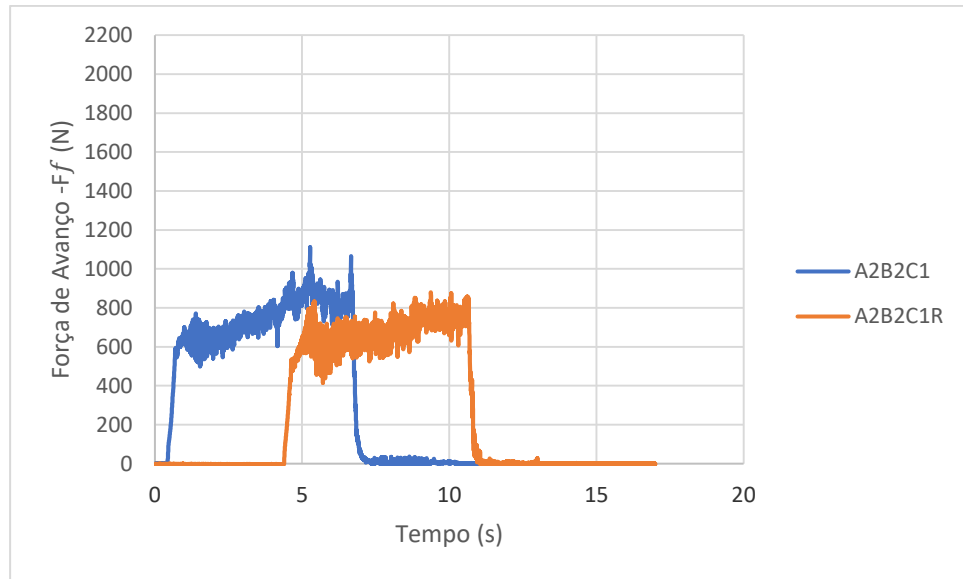
55. SUBRAMANIAN, C. et al. Performance evaluation of TiN-coated twist drills using force measurement and microscopy. **Surface and Coatings Technology**, v. 62, n. 1-3, p. 641-648, Dezembro 1993.
56. SUMESH, A.; SHIBU, M. Optimization of drilling parameters for minimum surface. **Journal of Mechanical and Civil Engineering**, p. 12-20, 2016.
57. SUNG, P. **Robust design and analysis for quality engineering**. 1. ed. [S.l.]: Springer US, 1996.
58. TEKAUT, I.; DEMIR, H.; SEKER, U. The relationship of cutting force with hole quality in drilling process of AISI H13 steel. **MTEC Web of Conferences**, v. 129, p. 4, 2017.
59. TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**. 4th. ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000.
60. VIANA, H. **Desempenho de brocas HSS revestidas na furação de ligas Al-Si**. Dissertação de mestrado do programa de pós-graduação em Eng. Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia - UFU. [S.l.], p. 143. 2004.
61. WARCHOLINSKI, B.; GILEWICZ, A. Multilayer coatings on tools for woodworking. **Wear**, v. 271, n. 11-12, p. 2812-2820, September 2011.
62. ZITOUNE, R.; KRISHNARAJ, V.; COLLOMBET, F. Study of drilling of composite material and aluminium stack. **Composite Structures**, v. 92, p. 1246-1255, 2010.

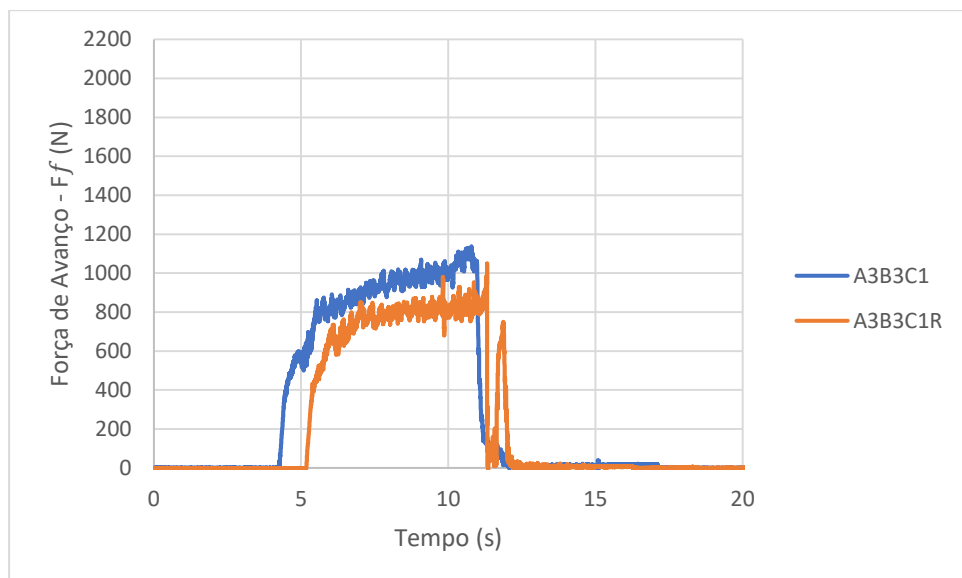
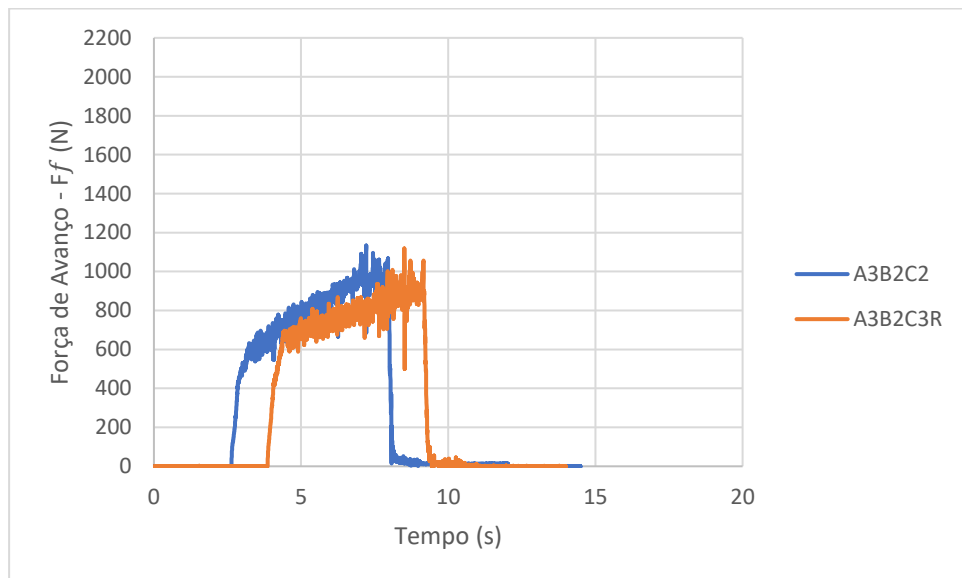
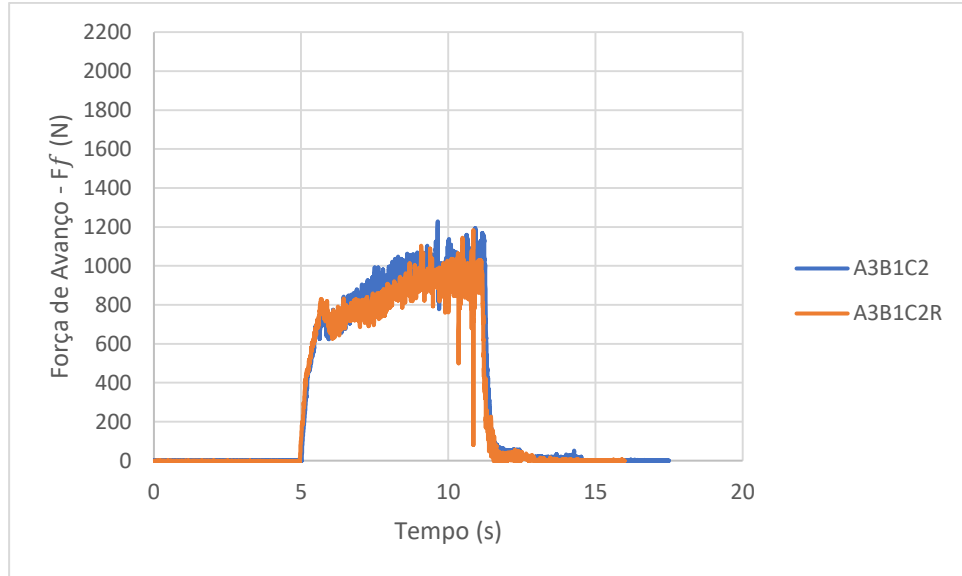
APÊNDICE A

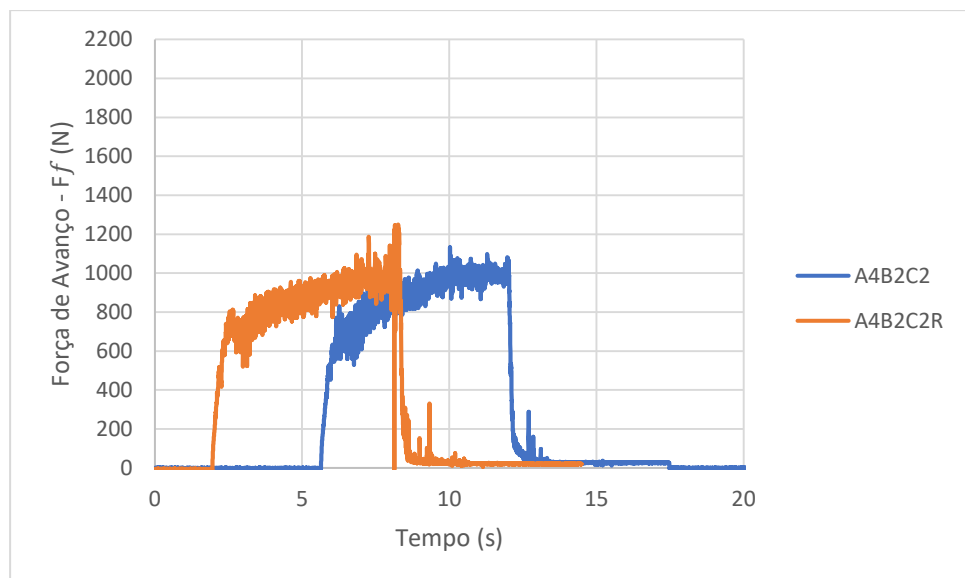
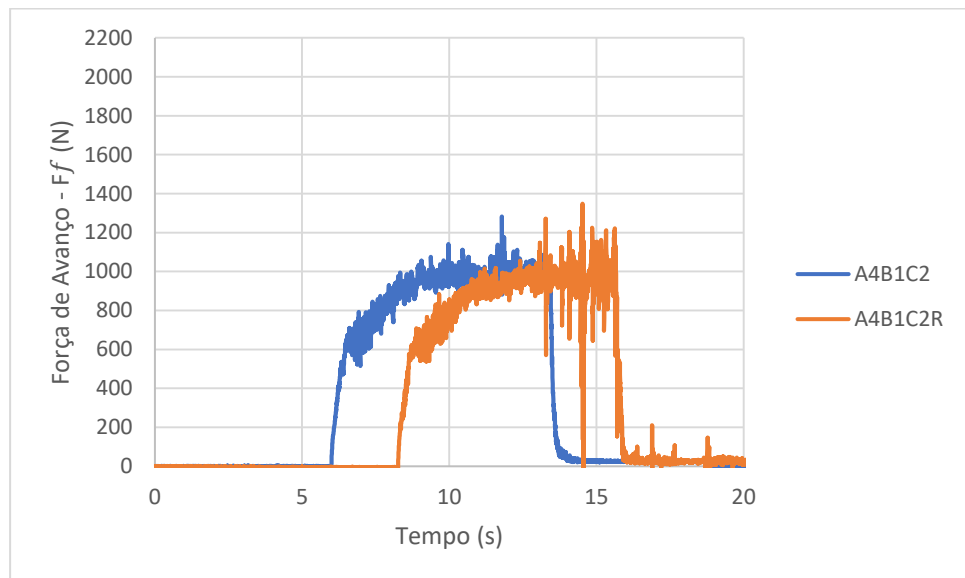
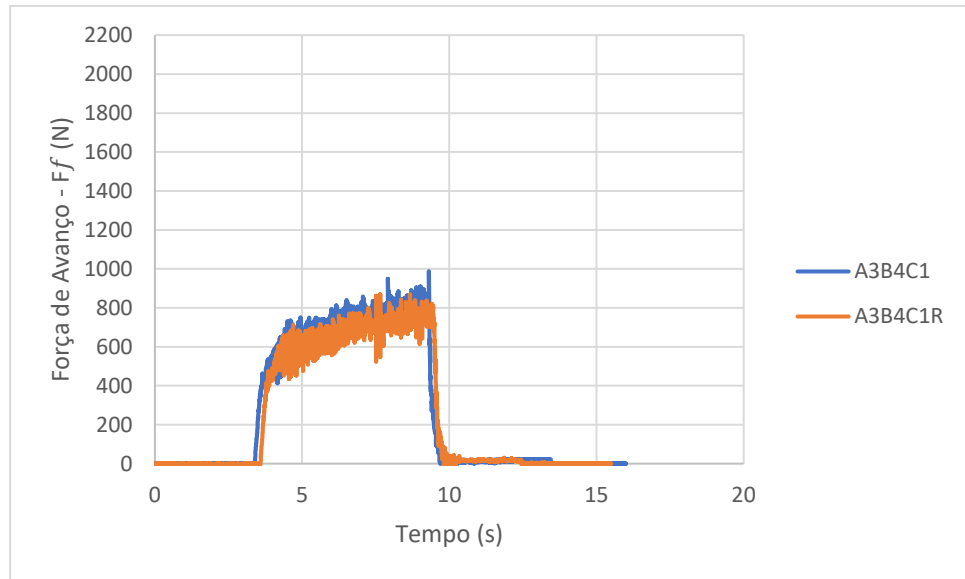
Gráficos de sinais - Força de avanço F_f (N) x Tempo (s)

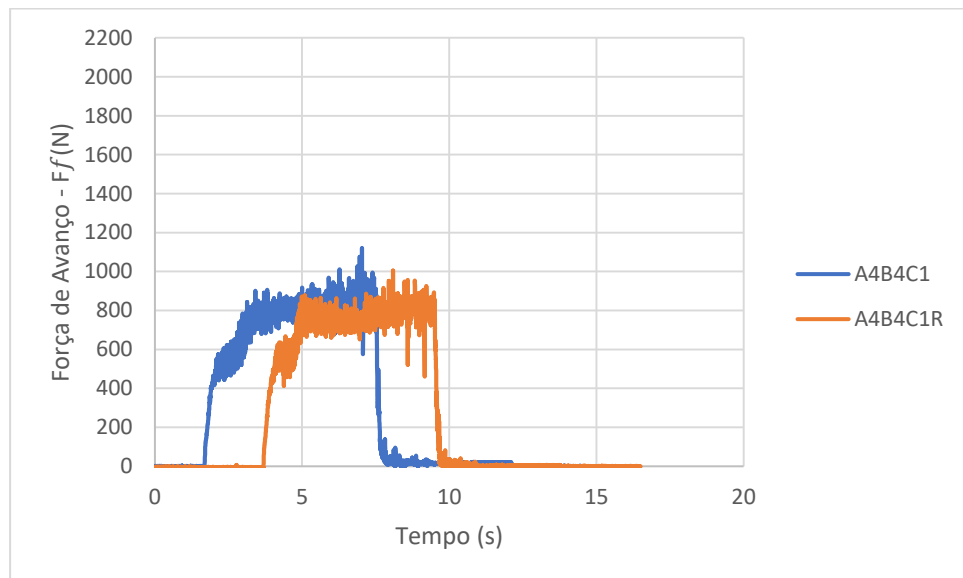
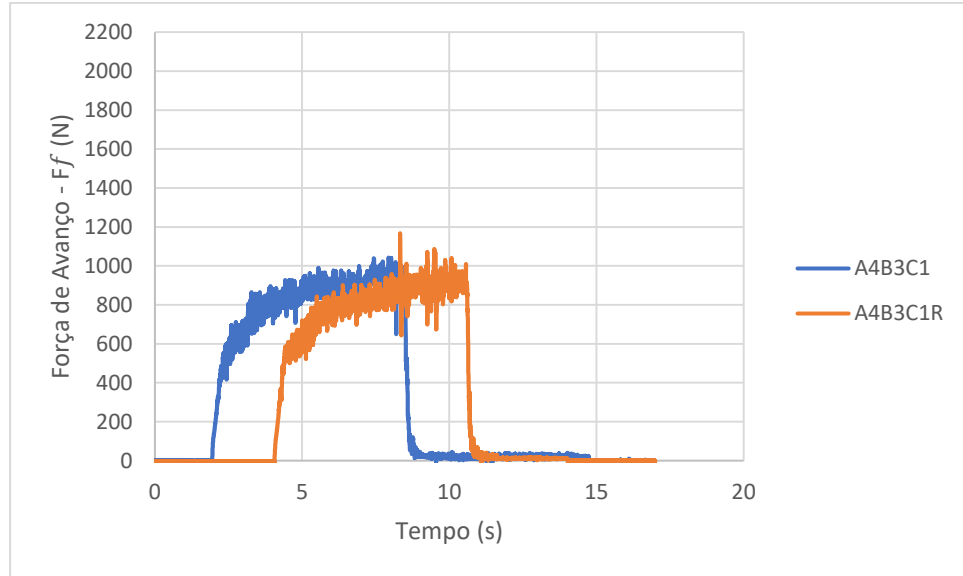












APÊNDICE B

Valores medidos de Ra

ENSAIO	Revestimento	Velocidade de Corte	Taxa de avanço	Ra1	Ra2	Ra_m	Desv. p
A1B1C1	Sem	12	0,10	3,826	3,809	3,818	0,012
A1B2C1	Sem	14	0,10	4,894	4,914	4,904	0,014
A1B3C2	Sem	16	0,12	3,491	3,367	3,429	0,088
A1B4C2	Sem	18	0,12	3,945	3,923	3,934	0,016
A2B1C1	TiN	12	0,10	2,602	2,592	2,597	0,007
A2B2C1	TiN	14	0,10	3,207	3,05	3,129	0,111
A2B3C2	TiN	16	0,12	2,584	2,556	2,570	0,020
A2B4C2	TiN	18	0,12	2,45	2,484	2,467	0,024
A3B1C2	TiNAI	12	0,12	3,04	3,012	3,026	0,020
A3B2C2	TiNAI	14	0,12	3,338	3,619	3,479	0,199
A3B3C1	TiNAI	16	0,10	2,394	2,194	2,294	0,141
A3B4C1	TiNAI	18	0,10	2,655	2,184	2,420	0,333
A4B1C2	TiNAI-M	12	0,12	2,202	2,339	2,271	0,097
A4B2C2	TiNAI-M	14	0,12	2,203	2,193	2,198	0,007
A4B3C1	TiNAI-M	16	0,10	2,528	2,542	2,535	0,010
A4B4C1	TiNAI-M	18	0,10	2,193	2,802	2,498	0,431

Valores medidos de Força de avanço (Ff)

ENSAIO	Revestimento	Velocidade de Corte	Taxa de avanço	Ff1	Ff2	Ff_m	Desv. p
A1B1C1	Sem	12	0,10	1019,959	1004,321	1012,14	11,058
A1B2C1	Sem	14	0,10	1125,258	1136,17	1130,714	7,716
A1B3C2	Sem	16	0,12	1973,408	1859,728	1916,568	80,384
A1B4C2	Sem	18	0,12	2043,456	2001,197	2022,327	29,882
A2B1C1	TiN	12	0,10	728,0867	788,53	758,3084	42,740
A2B2C1	TiN	14	0,10	1112,358	880,16	880,16	164,189
A2B3C2	TiN	16	0,12	1055,171	1149,745	1102,458	66,874
A2B4C2	TiN	18	0,12	1217,02	1151,883	1184,452	46,059
A3B1C2	TiNAI	12	0,12	1228,383	1184,17	1206,277	31,263
A3B2C2	TiNAI	14	0,12	1133,845	1118,695	1126,27	10,713
A3B3C1	TiNAI	16	0,10	1137,408	1049,62	1093,514	62,075
A3B4C1	TiNAI	18	0,10	987,634	870,1102	928,8721	83,102
A4B1C2	TiNAI-M	12	0,12	1282,151	1348,283	1315,217	46,762
A4B2C2	TiNAI-M	14	0,12	1133,372	1248,914	1191,143	81,701
A4B3C1	TiNAI-M	16	0,10	1042,981	1167,432	1105,207	88,000
A4B4C1	TiNAI-M	18	0,10	1120,215	1004,81	1062,513	81,604

APÊNDICE C

Análise Taguchi para valores de Ra (Minitab 17)

Análise Taguchi: Ra_m versus A, B, C

Tabela de Resposta para Razões sinal-ruído
Menor é melhor

Nível	A	B	C
1	-12.012	-9.166	-9.320
2	-8.560	-10.347	-9.131
3	-8.833	-8.548	
4	-7.499	-8.842	
Delta	4.513	1.798	0.189
Posto	1	2	3

Tabela de Resposta para Médias

Nível	A	B	C
1	4.021	2.928	3.024
2	2.691	3.427	2.922
3	2.805	2.707	
4	2.376	2.830	
Delta	1.646	0.720	0.103
Posto	1	2	3

Análise Taguchi para Força de avanço (Ff) (Minitab 17)

Análise Taguchi: Ff_m versus A, B, C

Tabela de Resposta para Razões sinal-ruído
Menor é melhor

Nível	A	B	C
1	-63.23	-60.43	-59.94
2	-59.70	-60.63	-62.58
3	-60.78	-62.12	
4	-61.32	-61.87	
Delta	3.53	1.69	2.64
Posto	1	3	2

Tabela de Resposta para Médias

Nível	A	B	C
1	1520.4	1073.0	1001.9
2	981.3	1082.1	1383.1
3	1099.7	1315.4	
4	1168.5	1299.5	
Delta	539.1	242.4	381.2
Posto	1	3	2

Análise de variância ANOVA para Ra (Minitab 17)

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
A	3	6.25480	2.08493	13.91	0.002
B	3	1.19867	0.39956	2.67	0.119
C	1	0.04213	0.04213	0.28	0.610
Erro	8	1.19867	0.14983		
Total	15	8.69427			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0.387084	86.21%	74.15%	44.85%

Coeficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	2.9729	0.0968	30.72	0.000	
A					
1	1.048	0.168	6.25	0.000	1.50
2	-0.282	0.168	-1.68	0.131	1.50
3	-0.168	0.168	-1.00	0.344	1.50
4	-0.597	0.168	-3.56	0.007	*
B					
1	-0.045	0.168	-0.27	0.794	1.50
2	0.454	0.168	2.71	0.027	1.50
3	-0.266	0.168	-1.59	0.151	1.50
4	-0.143	0.168	-0.85	0.418	*
C					
1	0.0513	0.0968	0.53	0.610	1.00
2	-0.0513	0.0968	-0.53	0.610	*

Equação de Regressão

$$Ra_m = 2.9729 + 1.048 A_1 - 0.282 A_2 - 0.168 A_3 - 0.597 A_4 - 0.045 B_1 + 0.454 B_2 - 0.266 B_3 - 0.143 B_4 + 0.0513 C_1 - 0.0513 C_2$$

Análise de variância ANOVA para Força de avanço (Ff) (Minitab 17)

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
A	3	645260	215087	7.77	0.009
B	3	212171	70724	2.55	0.129
C	1	581173	581173	20.98	0.002
Erro	8	221569	27696		
Total	15	1660174			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
166.422	86.65%	74.98%	46.62%

Coefficientes

Termo	Coef	EP de		Valor-T	Valor-P	VIF
		Coef	Coef			
Constante	1192.5	41.6	28.66	28.66	0.000	
A						
1	327.9	72.1	4.55	4.55	0.002	1.50
2	-211.2	72.1	-2.93	-2.93	0.019	1.50
3	-92.8	72.1	-1.29	-1.29	0.234	1.50
4	-24.0	72.1	-0.33	-0.33	0.748	*
B						
1	-119.5	72.1	-1.66	-1.66	0.136	1.50
2	-110.4	72.1	-1.53	-1.53	0.164	1.50
3	122.9	72.1	1.71	1.71	0.126	1.50
4	107.0	72.1	1.49	1.49	0.176	*
C						
1	-190.6	41.6	-4.58	-4.58	0.002	1.00
2	190.6	41.6	4.58	4.58	0.002	*

Equação de Regressão

$$Ff_m = 1192.5 + 327.9 A_1 - 211.2 A_2 - 92.8 A_3 - 24.0 A_4 - 119.5 B_1 - 110.4 B_2 + 122.9 B_3 + 107.0 B_4 - 190.6 C_1 + 190.6 C_2$$