

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DA USINABILIDADE DO AÇO C45 NORMALIZADO E DO AÇO C45
COM ALÍVIO DE TENSÃO POR MEIO DE TORNEAMENTO INTERNO À SECO
EM TUBO SEM COSTURA TREFILADO A FRIO**

Henrique Oliveira Santos

BELO HORIZONTE

Maio de 2024

Henrique Oliveira Santos

**ANÁLISE DA USINABILIDADE DO AÇO C45 NORMALIZADO E DO AÇO C45
COM ALÍVIO DE TENSÃO POR MEIO DE TORNEAMENTO INTERNO À SECO
EM TUBO SEM COSTURA TREFILADO A FRIO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcello Rosa Dumont

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo dos Santos

BELO HORIZONTE

Maio de 2024

Santos, Henrique Oliveira.
S237a Análise da usinabilidade do aço C45 normalizado e do aço C45 com alívio de tensão por meio de torneamento interno à seco em tubo sem costura trefilado a frio / Henrique Oliveira Santos. – 2024.
159 f. : il.
Orientador: Marcello Rosa Dumont.
Coorientador: Carlos Eduardo dos Santos.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2024.
Bibliografia.
1. Aço-carbono. 2. Torneamento. 3. Cortes de materiais - Descarte de cavacos. 4. Ferramentas para corte de metal. 5. Rugosidade superficial. 6. Corte - Velocidade. I. Dumont, Marcello Rosa. II. Santos, Carlos Eduardo dos. III. Título.
CDD: 671.35



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 20 / 2024 - POSMAT (11.52.07)

Nº do Protocolo: 23062.026057/2024-95

Belo Horizonte-MG, 27 de maio de 2024.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

*ANÁLISE DA USINABILIDADE DO AÇO C45 NORMALIZADO E DO AÇO C45
COM ALÍVIO DE TENSÃO POR MEIO DE TORNEAMENTO INTERNO À SECO
DE TUBO SEM COSTURA TREFILADO A FRIO*

Autor: Henrique Oliveira Santos

Orientador: Prof. Dr. Marcello Rosa Dumont

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou em 28 de maio de 2024 esta Dissertação:

Prof. Dr. Marcello Rosa Dumont (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Carlos Eduardo dos Santos (COORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva (EXAMINADOR INTERNO)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG

Prof. Dr. Luis Henrique Andrade Maia (EXAMINADOR EXTERNO)
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC Minas

(Assinado digitalmente em 31/05/2024 15:58)
CARLOS EDUARDO DOS SANTOS
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEMAT (11.55.06)
Matrícula: 3573881

(Assinado digitalmente em 29/05/2024 14:46)
ERNANE RODRIGUES DA SILVA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
CEMAT (11.51.06)
Matrícula: 392338

(Assinado digitalmente em 28/05/2024 16:35)
MARCELLO ROSA DUMONT
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEMAT (11.55.06)
Matrícula: 2143739

(Assinado digitalmente em 14/10/2024 11:34)
LUIS HENRIQUE ANDRADE MAIA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.546-##

Dedico este trabalho a todos que, ao longo do tempo, me incentivaram e contribuíram para o meu desenvolvimento pessoal e profissional, tornando possível minha chegada até este momento.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me conceder a bênção da vida. Nele deposito minha fé, que me dá entusiasmo e força interior para superar os dias que possam não ser favoráveis.

Agradeço aos meus familiares, especialmente aos meus pais (in memoriam), pela educação excepcional que me proporcionaram, apesar de não terem concluído nem o ensino primário. Eles foram mestres na educação informal e possuidores de um profundo conhecimento popular.

Ao meu amigo Everaldo José da Silva, colega do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Qualidade, que, em uma conversa informal, me apresentou o Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. Ele me incentivou a cursar disciplinas isoladas para conhecer o programa, o que eventualmente me levou a ingressar como aluno regular.

À minha esposa Daniela, aos meus filhos Thayná, Thaysla, Henrique Júnior e Pedro, pelo apoio, motivação e compreensão ao longo de toda a trajetória da formação acadêmica.

Ao Prof. Dr. Marcello Rosa Dumont, meu orientador, primeiramente por aceitar a proposta de Trabalho, em segundo, por toda sua excelência no auxílio no desenvolvimento do trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Carlos Eduardo dos Santos, meu coorientador neste trabalho, por compartilhar seu conhecimento e por sua disponibilidade em me ajudar a superar todos os desafios enfrentados ao longo do projeto.

Agradeço a Mickaela Barbosa, estudante de Engenharia de Materiais no CEFET-MG, pelo suporte nos ensaios mecânicos e de usinabilidade.

Aos professores Dr. Luis Henrique Andrade Maia (PUC MINAS) e Dr. Ernane Rodrigues da Silva (CEFET-MG/POSMAT), membros da banca de qualificação, pelas valiosas sugestões que contribuíram para a finalização do trabalho.

À empresa Vallourec, com especial reconhecimento à Engenheira M.a. Mirelle Oliveira Spindola pelo apoio técnico oferecido.

Por fim, expresso meu agradecimento a todos os meus professores e colegas de aula, cada um com suas especificidades, que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

O torneamento a seco na superfície do diâmetro interno de um material com geometria tubular representa um processo de usinagem complexo, caracterizado por uma significativa remoção de material bem como diferentes reações mecânicas durante a manufatura. Estudos voltados para otimizar esse processo têm sido objeto de pesquisa, abrangendo fatores como as propriedades mecânicas dos materiais, microestrutura, elementos da composição química, revestimentos aplicados nos insertos de usinagem, formação do cavaco, além da compreensão dos parâmetros de velocidade de corte e avanço, relacionados aos mencionados fatores, visando aprimorar a usinabilidade e a produtividade. Neste trabalho foram avaliados e descritos os parâmetros mais otimizados para o torneamento a seco no diâmetro interno, considerando as variáveis independentes velocidade de corte e avanço, juntamente com fatores fixos, como a profundidade de corte, geometria e revestimento dos insertos de usinagem. Foi utilizado o aço C45 proveniente de tubo sem costura trefilado a frio, com tratamento térmico de normalização, e tubo sem costura trefilado a frio, com tratamento térmico de alívio de tensão, tomando como referência o torneamento a seco no diâmetro interno. No decorrer dos ensaios acompanhou-se a evolução do desgaste de flanco até atingir o critério de falha por meio do desgaste de flanco máximo de 0,30 mm. Foi observado que, em ambos os estados de fornecimento, as variáveis dependentes (R_a , R_t e R_z) foram significativamente afetadas pelas variáveis explicativas (avanço e velocidade de corte) e sua interação, com um nível de significância de 5 %. Além disso, foi constatado que o avanço teve a maior influência no aumento da rugosidade em ambos os estados de fornecimento. Menos problemas na formação dos cavacos foram observados no estado de fornecimento normalizado do aço C45, apresentando uma morfologia predominantemente fragmentada em comparação com o estado de fornecimento com alívio de tensão. Nos experimentos, os desgastes de flanco no estado normalizado mostraram-se consistentes e estáveis com o aumento do volume usinado, ao contrário do estado com alívio de tensão, que apresentou variações mais acentuadas. Além disso, o estado de fornecimento normalizado teve um melhor desempenho na redução de rugosidade ao considerar o índice de variação, o qual incorpora média, desvio padrão e número de repetições, garantindo uma avaliação mais precisa dos resultados.

Palavras chaves: Aço C45. Torneamento interno a seco. Cavaco. Inseto de usinagem. Rugosidade. Velocidade de corte. Avanço.

ABSTRACT

Dry turning on the inner diameter surface of a material with tubular geometry represents a complex machining process, characterized by significant material removal as well as different mechanical reactions during manufacturing. Studies aimed at optimizing this process have been the subject of research, covering factors such as material mechanical properties, microstructure, elements of chemical composition, coatings applied on machining inserts, chip formation, as well as understanding cutting speed and feed parameters related to these factors, aiming to improve machinability and productivity. In this work, the most optimized parameters for dry turning on the inner diameter were evaluated and described, considering the independent variables cutting speed and feed, along with fixed factors such as cutting depth, geometry, and coating of machining inserts. The C45 steel from cold-drawn seamless tube, with normalization heat treatment, and cold-drawn seamless tube with stress relief heat treatment were used as reference for dry turning on the inner diameter. Throughout the experiments, the evolution of flank wear was monitored until reaching the failure criterion through maximum flank wear of 0.30 mm. It was observed that, in both supply states, the dependent variables (R_a , R_t , and R_z) were significantly affected by the explanatory variables (feed and cutting speed) and their interaction, with a significance level of 5 %. Additionally, it was found that feed had the greatest influence on increasing roughness in both supply states. Fewer problems in chip formation were observed in the normalized supply condition of C45 steel, with exhibited predominantly fragmented chip morphology compared to the stress-relieved supply condition. In the experiments, flank wear in the normalized state proved to be consistent and stable with increasing machining volume, unlike the stress relief state, which showed more pronounced variations. Furthermore, the normalized supply state performed better in reducing roughness when considering the variation index, which incorporates mean, standard deviation, and number of repetitions, ensuring a more precise evaluation of the results.

Keywords: C45 Steel. Dry internal turning. Chip. Machining insert. Roughness. Cutting speed. Feed.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Resumo dos métodos disponíveis na engenharia de superfície	27
Figura 2 - Parâmetros de corte e superfícies em torneamento cilíndrico externo	28
Figura 3 - Parâmetros de corte e superfícies em torneamento cilíndrico externo	31
Figura 4 - Relação dos materiais para ferramenta de corte e as respectivas propriedades	33
Figura 5 - Classificação dos ensaios de usinabilidade	40
Figura 6 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte	42
Figura 7 - Desgaste de cratera.....	43
Figura 8 - Desgaste de flanco ou na superfície de folga	43
Figura 9 - Desgaste de entalhe	45
Figura 10 - Zonas para caracterização dos desgastes de ferramentas de tornear.....	47
Figura 11 - Desvio aritmético médio (Ra)	50
Figura 12 - Altura total do perfil (Rt)	51
Figura 13 - Parâmetro Rz	52
Figura 14 - Mecanismo de formação de cavacos.....	53
Figura 15 - Formas de cavacos produzidos na usinagem dos metais	56
Figura 16 - Fluxograma da sequência dos procedimentos.....	59
Figura 17 - Modelo de corpo de prova utilizado pra o ensaio de usinabilidade ..	60
Figura 18 - Desenho legenda das cotas do corpo de prova de tração uniaxial ..	65
Figura 19 - Representação do inserto de usinagem.....	66
Figura 20 - Representação do suporte do insertos de usinagem	67
Figura 21 – Ilustração da ferramenta de corte VBMT110304-MV UE6020 e suas arestas de corte.....	68
Figura 22 - Localização da medição da rugosidade	69
Figura 23 - Microestrutura do aço C 45 com os tratamentos térmicos.	72
Figura 24 - Rugosidades Ra, Rt e RZ – fn fixo 0,15 mm/rot x Vc variando	75
Figura 25 - Rugosidades Ra, Rt e RZ – fn fixo 0,23 mm/rot x Vc variando	76
Figura 26 - Rugosidades Ra, Rt e RZ – fn fixo 0,30 mm/rot x Vc variando	78
Figura 27 - Rugosidades Ra, Rt e RZ – fn variando x Vc fixa 180 m/min	80
Figura 28 - Rugosidades Ra, Rt e RZ – fn variando x Vc fixa 278 m/min	81
Figura 29 - Rugosidades Ra, Rt e RZ – fn variando x Vc fixa 300 m/min	82
Figura 30 - Rugosidade (Ra) em função do volume usinado (Q) no estado de fornecimento +N.....	84
Figura 31 - Rugosidade (Rt) em função do volume usinado (Q) no estado de fornecimento +N.....	85
Figura 32 - Rugosidade (Rz) em função do volume usinado (Q) no estado de fornecimento +N.....	86
Figura 33 - Rugosidade (Ra) em função do volume usinado (Q) no estado de fornecimento +SR.....	88
Figura 34 - Rugosidade (Rt) em função do volume usinado (Q) no estado de fornecimento +SR.....	89

Figura 35 - Rugosidade (Rz) em função do volume usinado (Q) no estado de fornecimento +SR.....	89
Figura 36 - Gráfico de correlação do parâmetro de Rugosidade (Rt) em função de Ra no estado de fornecimento +N.....	97
Figura 37 - Gráfico de correlação do parâmetro de Rugosidade (Rz) em função de Ra no estado de fornecimento +N.....	97
Figura 38 - Gráfico de correlação do parâmetro de Rugosidade (Rt) em função de Rz no estado de fornecimento +N.....	98
Figura 39 - Gráfico de correlação do parâmetro de Rugosidade (Rt) em função de Ra no estado de fornecimento +SR.....	99
Figura 40 - Gráfico de correlação do parâmetro de Rugosidade (Rz) em função de Ra no estado de fornecimento +SR.....	100
Figura 41 - Gráfico de correlação do parâmetro de Rugosidade (Rt) em função de Rz no estado de fornecimento +SR.....	101
Figura 42 - Gráficos de Pareto dos efeitos padronizados dos parâmetros de Rugosidade Ra, Rt e Rz – C45 +SR.....	120
Figura 43 - Gráficos de resíduos do parâmetro de Rugosidade Ra – C45 +SR.....	121
Figura 44 - Gráficos de resíduos do parâmetro de Rugosidade Rt – C45 +SR.....	122
Figura 45 - Gráficos de resíduos do parâmetro de Rugosidade Rz – C45 +SR.....	123
Figura 46 - Gráficos de efeitos principais do parâmetro de Rugosidade Ra – C45 +SR.....	124
Figura 47 - Gráficos de efeitos principais do parâmetro de Rugosidade Rt – C45 +SR.....	125
Figura 48 - Gráficos de efeitos principais do parâmetro de Rugosidade Rz – C45 +SR.....	126
Figura 49 - Gráfico de interação do parâmetro de Rugosidade Ra – C45 +SR.....	126
Figura 50 - Gráfico de interação do parâmetro de Rugosidade Rt – C45 +SR.....	127
Figura 51 - Gráfico de interação do parâmetro de Rugosidade Rz – C45 +SR.....	128
Figura 52 - Gráficos de Pareto dos efeitos padronizados dos parâmetros de Rugosidade Ra, Rt e Rz – C45 +N.....	129
Figura 53 - Gráficos de resíduos do parâmetro de Rugosidade Ra – C45 +N.....	131
Figura 54 - Gráficos de resíduos do parâmetro de Rugosidade Rt – C45 +N.....	131
Figura 55 - Gráficos de resíduos do parâmetro de Rugosidade Rz – C45 +N.....	132
Figura 56 - Gráficos de efeitos principais do parâmetro de Rugosidade Ra – C45 +N.....	133
Figura 57 - Gráficos de efeitos principais do parâmetro de Rugosidade Rt – C45 +N.....	134
Figura 58 - Gráficos de efeitos principais do parâmetro de Rugosidade Rz – C45 +N.....	135
Figura 59 - Gráfico de interação do parâmetro de Rugosidade Ra – C45 +N.....	135
Figura 60 - Gráfico de interação do parâmetro de Rugosidade Rt – C45 +N.....	136
Figura 61 - Gráfico de interação do parâmetro de Rugosidade Rz – C45 +N.....	137
Figura 62 - Forma do cavaco do experimento 0,15-180, (a) 1º passe VB 0,037 mm e (b) 8º passe 0,110 mm - C45 +SR.....	138
Figura 63 - Forma do cavaco do experimento 0,23-180, (a) 1º passe VB 0,020 mm e (b) 8º passe VB 0,086 mm - C45 +SR.....	139

Figura 64 - Forma do cavaco do experimento 0,30-180, (a) 1º passe VB 0,054 mm e (b) 8º passe VB 0,300 mm - C45 +SR	139
Figura 65 - Forma do cavaco do experimento 0,15-278, (a) 1º passe VB 0,041 mm e (b) 8º passe VB 0,170 mm - C45 +SR	140
Figura 66 - Forma do cavaco do experimento 0,23-278, (a) 1º passe VB 0,118 mm e (b) 8º passe VB 0,292 mm - C45 +SR	140
Figura 67 - Forma do cavaco do experimento 0,30-278, (a) 1º passe VB 0,102 mm e (b) 8º passe VB 0,300 mm - C45 +SR	141
Figura 68 - Forma do cavaco do experimento 0,15-300, (a) 1º passe VB 0,046 mm e (b) 6º passe VB 0,300 mm - C45 +SR	141
Figura 69 - Forma do cavaco do experimento 0,23-300, (a) 1º passe VB 0,173 mm e (b) 2º passe VB 0,300 mm - C45 +SR	142
Figura 70 - Forma do cavaco do experimento 0,30-300, (a) 1º passe VB 0,300 mm - C45 +SR	142
Figura 71 - Forma do cavaco do experimento 0,15-180, (a) 1º passe VB 0,159 mm e (b) 5º passe VB 0,201 mm - C45 +N	143
Figura 72 - Forma do cavaco do experimento 0,23-180, (a) 1º passe VB 0,193 mm e (b) 5º passe VB 0,262 mm - C45 +N	144
Figura 73 - Forma do cavaco do experimento 0,30-180, (a) 1º passe VB 0,108 mm e (b) 5º passe VB 0,162 mm - C45 +N	144
Figura 74 - Forma do cavaco do experimento 0,15-278, (a) 1º passe VB 0,184 mm e (b) 5º passe VB 0,239 mm - C45 +N	145
Figura 75 - Forma do cavaco do experimento 0,23-278, (a) 1º passe VB 0,154 mm e (b) 5º passe VB 0,218 mm - C45 +N	145
Figura 76 - Forma do cavaco do experimento 0,30-278, (a) 1º passe VB 0,114 mm e (b) 5º passe VB 0,201 mm - C45 +N	146
Figura 77 - Forma do cavaco do experimento 0,15-300, (a) 1º passe VB 0,146 mm e (b) 5º passe VB 0,177 mm - C45 +N	146
Figura 78 - Forma do cavaco do experimento 0,23-300, (a) 1º passe VB 0,132 mm e (b) 5º passe VB 0,210 mm - C45 +N	147
Figura 79 - Forma do cavaco do experimento 0,30-300, (a) 1º passe 0,215 mm e (b) 2º passe VB 0,300 mm - C45 +N	147
Figura 80 - Gráfico dos desgastes da aresta de corte ou flanco (VB) em relação ao volume usinado (Q) - C45 +N	150
Figura 81 - Gráfico dos desgastes da aresta de corte ou flanco (VB) em relação ao volume usinado (Q) - C45 +SR	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação, características e aplicações de aços binários em função do teor de carbono	23
Tabela 2 - Equivalência dos aços conforme sistema DIN e SAE.	24
Tabela 3 - Classificação dos processos de usinagem conforme tipo de ferramenta utilizada para retirada do material da peça.	30
Tabela 4 - Classificação dos metais duros.....	35
Tabela 5 - Tecnologias aplicadas para melhoria da usinabilidade.	38
Tabela 6 - Critérios de fim de vida mais utilizados para ferramentas de carbeto sinterizado (metal duro).....	46
Tabela 7 - Principais parâmetros de rugosidade	49
Tabela 8 - Dimensões dos corpos de prova e relação entre comprimento (mm) e diâmetro (mm)	61
Tabela 9 - Parâmetros de entrada de usinagem e planejamento dos experimentos para o material C45 com tratamento térmico de Alívio de Tensão.....	62
Tabela 10 - Parâmetros de entrada de usinagem e matriz de experimentos para o material C45 com tratamento térmico de Normalização.....	63
Tabela 11 - Dimensões dos corpos de prova de tração uniaxial previstas pela norma ASTM A370.....	65
Tabela 12 - Especificações do inserto de usinagem	66
Tabela 13 - Especificações do suporte do inserto de usinagem	67
Tabela 14 - Composição química (% em massa) do aço C45.....	71
Tabela 15 - Dureza Vickers das amostras	73
Tabela 16 - Propriedades mecânicas do aço C45 relacionadas ao ensaio de tração até a fratura dos corpos de prova.....	73
Tabela 17 - Experimentos conduzidos no processo de torneamento interno a seco para o aço C45 com tratamento térmico de alívio de tensão (+SR)	91
Tabela 18 - Experimentos conduzidos no processo de torneamento interno a seco para o aço C45 com tratamento térmico de normalização (+N)	91
Tabela 19 - Estatística descritiva – Resultados dos parâmetros Ra, Rt e Rz para o aço C45 +SR.....	93
Tabela 20 - Estatística descritiva – Resultados dos parâmetros Ra, Rt e Rz para o aço C45 +N	95
Tabela 21 - Variáveis independentes utilizadas no modelo	102
Tabela 22 - Análise de variância – Parâmetro Ra – Aço C45 +SR	104
Tabela 23 - Análise de variância – Parâmetro Rt – Aço C45 +SR	104
Tabela 24 - Análise de variância – Parâmetro Rz – Aço C45 +SR	105
Tabela 25 - Análise de variância – Parâmetro Ra – Aço C45 +N.....	106
Tabela 26 - Análise de variância – Parâmetro Rt – Aço C45 +N.....	106
Tabela 27 - Análise de variância – Parâmetro Rz – Aço C45 +N.....	107
Tabela 28 - Coeficientes – Parâmetro de rugosidade Ra - Aço C45 +SR.....	109
Tabela 29 - Sumário do modelo – Parâmetro de rugosidade Ra - Aço C45 +SR	110

Tabela 30 - Coeficientes – Parâmetro de rugosidade Rt - Aço C45 +SR.....	111
Tabela 31 - Sumário do modelo – Parâmetro de rugosidade Rt - Aço C45 +SR	111
Tabela 32 - Coeficientes – Parâmetro de rugosidade Rz - Aço C45 +SR	113
Tabela 33 - Sumário do modelo – Parâmetro de rugosidade Rz - Aço C45 +SR	113
Tabela 34 - Coeficientes – Parâmetro de rugosidade Ra - Aço C45 +N	115
Tabela 35 - Sumário do modelo – Parâmetro de rugosidade Ra - Aço C45 +N	115
Tabela 36 - Coeficientes – Parâmetro de rugosidade Rt - Aço C45 +N	116
Tabela 37 - Sumário do modelo – Parâmetro de rugosidade Rt - Aço C45 +N	117
Tabela 38 - Coeficientes – Parâmetro de rugosidade Rz - Aço C45 +N	118
Tabela 39 - Sumário do modelo – Parâmetro de rugosidade Rz - Aço C45 +N	119

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação brasileira de norma técnica
AISI	Instituto Americano de ferro e aço (American Iron Steel Institute)
ANOVA	Análise de variância (Analysis of Variance)
APC	Aresta postiça de corte
ASTM	Sociedade Americana para testes e materiais (American society for testing and materials)
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CNC	Comando numérico computadorizado
CV	Coeficiente de variação
CVD	Deposição química de vapor
DEMAT	Departamento de materiais
DIN	Instituto Alemão de Normalização (Deutsches Institut für Normung)
En	Norma da União Europeia
GS	Aço fundido
HRC	Escala de dureza Rockwell escala C
HSS	Aço rápido (High speed steel)
ISO	Organização Internacional para padronização (International organization for standardization)
IV	Índice de variação
NBR	Norma brasileira
M.a.	Mestra
MEV	Microscopia eletrônica de varredura (Scanning electron microscopy)
POSMAT	Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais
PVD	Deposição física de vapor
RPM	Rotações por minuto
SAE	Society of automotive Engineers
+N	Estado de fornecimento com o tratamento térmico de normalização norma União Europeia

+SR

Estado de fornecimento com o tratamento térmico de alívio de
tensão norma União Europeia

LISTA DE SÍMBOLOS

μm	Micrometro	10^{-6} m
σ	Desvio padrão da amostra	
π	Constante	3,1416
S	Desvio padrão	
$\bar{x}$	Media da amostra	
°	Grau	
°C	Graus Celsius	
%	Percentual	
AFM	Microscópio de força atômica	
Al_2O_3	Óxido de alumínio (cerâmica)	
Ap	Profundidade de corte	
B	Boro	
Bi	Bismuto	
BUE	Build up edge	
C	Carbono	
C45	Aço carbono com teor de 0,45 % de carbono	
CBN	Nitreto boro cúbico	
Cm^2	Centímetro quadrado	
Coef	Coeficiente de intercepto	
DCON	Diâmetro da conexão do suporte do inserto de corte	
DMIN	Diâmetro mínimo do furo do suporte do inserto de corte	
EPSR	Ângulo da ponta do inserto de corte	
Fe-C	Ferro carbono	
f_n	Avanço	
GAMF	Ângulo de inclinação	
GAMP	Ângulo de saída ortogonal	
GL	Graus de liberdade	
H_0	Hipótese estatística nula	

H ₁	Hipótese estatística alternativa	
H	Altura da haste	
HV	Dureza Vickers	
KAPR	Ângulo da aresta de corte	
KB	Largura da cratera	
KM	Distância do centro da cratera	
KT	Profundidade da cratera	
kW	Quilowatt	10 ³ watts
Lc	Comprimento de corte	
LDRED	Balanço mínimo	
LF	Comprimento funcional	
mm	Milímetro	10 ⁻³ m
mm ³	Milímetro cúbico	
m/min	Metros por minuto	
mm/rot	Milímetro por rotação	
MPa	Mega Pascal	10 ⁶ Pa
NbC	Carboneto de Nióbio	
Nital	Ácido nítrico em álcool	
Pb	Chumbo	
p-valor calculado	Índice estatístico de significância calculado	
p-valor referência	Índice estatístico referência de significância	
Q	Volume usinado ou de material removido	
QM (Aj.)	Quadrado médio ajustado	
R	Coeficiente de correlação de Pearson	
R ²	Coeficiente de determinação	
R ² (aj)	Coeficiente de determinação ajustado	
R ² (pred)	Coeficiente de determinação predito	
R _a	Parâmetro bidimensional de desvio aritmético médio do perfil em avaliação	
RE	Raio da ponta do inserto de corte	
R _f	Raio final após a usinagem	

R_i	Raio inicial antes da usinagem
R_t	Parâmetro bidimensional da altura total do perfil
R_z	Parâmetro bidimensional de altura máxima média do perfil
Se	Selênio
SQ (Aj.)	Soma dos quadrados ajustado
TaC	Carboneto de Tântalo
Te	Telúrio
TiAlN	Revestimento de Nitreto de titânio alumínio
TiC	Carboneto de Titânio
TiCN	Revestimento de carbonitreto de titânio
TiN	Revestimento de Nitreto de titânio
VB	Desgaste de flanco médio ou aresta de corte
VB_A	Largura do desgaste de entalhe
VB_B	Desgaste de flanco máximo ou aresta de corte
VB_N	Comprimento do desgaste de entalhe
V_c	Velocidade de corte
VIF	Medida da multicolinearidade entre as variáveis independentes
Z_p	Maior altura dos picos do perfil
Z_v	Maior profundidade dos vales do perfil
Wc	Carboneto de tungstênio
WC+Co	Metal duro carbeto de tungstênio + cobalto
WF	Largura funcional
WF2	Altura menor da haste

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	OBJETIVOS.....	21
2.1	Objetivo geral	21
2.2	Objetivos específicos	21
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
3.1	Os aços	22
3.2	Os aços com médio teor de carbono	22
3.3	Classificação dos aços.....	23
3.4	Tratamentos térmicos.....	24
3.4.1	<i>Recozimento.....</i>	<i>24</i>
3.4.2	<i>Recozimento de normalização.....</i>	<i>25</i>
3.5	Engenharia de superfície e desgaste	26
3.6	Torneamento	27
3.7	Ferramentas de corte.....	29
3.7.1	<i>Geometria da ferramenta de corte.....</i>	<i>30</i>
3.7.2	<i>Seleção da ferramenta</i>	<i>31</i>
3.7.3	<i>Materiais para ferramentas de usinagem</i>	<i>32</i>
3.8	Usinabilidade dos materiais.....	37
3.9	Ensaio de usinabilidade	39
3.10	Desgaste e avarias nas ferramentas de corte	40
3.10.1	<i>Tipos de desgaste</i>	<i>41</i>
3.10.2	<i>Critério da vida útil das ferramentas (insertos de usinagem).....</i>	<i>45</i>
3.10.3	<i>Qualidade da superfície usinada</i>	<i>47</i>
3.10.4	<i>Características do cavaco e mecanismo de formação do cavaco</i>	<i>52</i>
3.11	Métodos estatísticos.....	57
3.11.1	<i>Planejamento de experimentos</i>	<i>57</i>

3.11.2	<i>análise estatística dos resultados do planejamento experimental</i>	57
4	MATERIAIS E MÉTODOS	59
4.1	Fluxograma	59
4.2	Materiais	60
4.3	Procedimento experimental de usinabilidade	60
4.4	Caracterizações	63
4.4.1	<i>Análise química</i>	63
4.4.2	<i>Análise metalográfica</i>	63
4.4.3	<i>Ensaio de dureza</i>	64
4.4.4	<i>Ensaio de tração</i>	64
4.5	Máquina operatriz de usinagem utilizada nos ensaios	65
4.6	Ferramentas de corte	65
4.7	Análise do desgaste e vida da ferramenta	68
4.8	Mensuração da rugosidade superficial bidimensional (2D)	68
4.9	Análise da formação dos cavacos	69
4.10	Análise do volume de material removido	69
4.11	Análise estatística dos resultados	70
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
5.1	Análise química	71
5.2	Análise metalográfica	72
5.3	Dureza	73
5.4	Tração	73
5.5	Análise da usinabilidade por meio de torneamento a seco no diâmetro interno do tubo sem costura do aço DIN C45 trefilado a frio	73
5.5.1	<i>Análise dos valores das rugosidades em função dos parâmetros de usinagem avanço e velocidade de corte por meio da média e desvio padrão</i>	74
5.5.2	<i>Análise da Rugosidade em função do volume Usinado (Q) por meio da média</i>	83

5.5.3	<i>Análise de estatística descritiva dos parâmetros de rugosidade Ra, Rt e Rz após usinagem do aço C45.....</i>	<i>90</i>
5.5.4	<i>Correlação entre os níveis de Rugosidade Ra, Rt e Rz no experimento com o tratamento térmico de normalização (+N)</i>	<i>95</i>
5.5.5	<i>Correlação entre os níveis de Rugosidade Ra, Rt e Rz no experimento com o tratamento térmico de alívio de tensão (+SR)</i>	<i>98</i>
5.5.6	<i>Análise de estatística inferencial dos parâmetros de rugosidade Ra, Rt e Rz após usinagem do aço C45.....</i>	<i>101</i>
5.5.7	<i>Variáveis dependentes (respostas) e independentes</i>	<i>101</i>
5.5.8	<i>Análise de variância (ANOVA).....</i>	<i>102</i>
5.5.9	<i>Análise de regressão linear múltipla.....</i>	<i>107</i>
5.5.10	<i>Análise dos gráficos da ANOVA para os experimentos realizados com o aço C45 no estado de fornecimento de alívio de tensão (+SR)</i>	<i>119</i>
5.5.11	<i>Análise dos gráficos da ANOVA para os experimentos realizados com o aço C45 no estado de fornecimento normalizado (+N)</i>	<i>128</i>
5.6	Análise da formação de cavacos do processo de torneamento interno a seco do aço C45	137
5.6.1	<i>Análise dos cavacos para o aço C45 no estado de fornecimento com alívio de tensão (+SR)</i>	<i>138</i>
5.6.2	<i>Análise dos cavacos para o aço C45 no estado de fornecimento normalizado (+N)</i>	<i>143</i>
5.7	Análise do desgaste da aresta de corte ou flanco (VB) em função do volume usinado (Q).....	148
6	CONCLUSÃO	152
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	154
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	155

1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história, o progresso e a evolução das sociedades estiveram intrinsecamente ligados às habilidades sem precedentes no sentido de seus membros em produzir e manipular materiais para atender às suas necessidades (CALLISTER, 2016).

Nos últimos anos, houve avanços significativos no campo da Ciência e Engenharia de Materiais; no entanto, persistem desafios tecnológicos importantes que merecem a atenção. Em todo o mundo, a qualidade de vida, a segurança econômica e militar estão cada vez mais ligadas à capacidade de sintetizar e processar materiais de forma eficiente, descobrindo novos materiais e integrando-os em tecnologias de produção que sejam economicamente eficientes e respeitem o meio ambiente e saúde humana. Um desses desafios atuais é o desenvolvimento de aços especiais para a fabricação de componentes mecânicos. Dada a ampla variedade de materiais disponíveis atualmente, a seleção desses materiais tornou-se uma etapa fundamental no desenvolvimento de produtos, máquinas e equipamentos em todas as áreas (HAHN, 1994).

O aço DIN C45 é um material com médio teor de carbono. Ao ser submetido ao processo de fabricação de tubos de aço sem costura por meio de trefilação a frio, seguido pelo tratamento térmico de normalização ou alívio de tensões, o material apresenta boa resistência mecânica a um custo comparativamente mais baixo em relação a outros materiais de liga que possuem propriedades e aplicações semelhantes ao aço DIN C45. Esse tipo de aço é amplamente utilizado na fabricação de peças, especialmente aquelas em que uma região ou seção fina precisa ser endurecida por tratamento térmico. Suas aplicações abrangem engrenagens, pinos, buchas, peças automotivas, componentes de máquinas e elementos estruturais de alta resistência, nos quais é essencial combinar alta resistência mecânica, resistência à abrasão e tenacidade.

Nos processos de usinagem por torneamento, uma estratégia eficaz para aumentar a produção envolve a modificação das condições de corte, particularmente a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte. A implementação de parâmetros mais rigorosos demanda pesquisa e desenvolvimento de matérias-primas, máquinas-ferramenta e ferramentas de corte inovadoras.

Devido à intensa concorrência entre os fabricantes de componentes mecânicos e outros setores, os fatores econômicos, ambientais e sociais desempenham um papel decisivo na seleção dos materiais utilizados. Essa escolha está vinculada à otimização do projeto do componente, dos materiais empregados, dos processos de fabricação e da vida útil das ferramentas de corte. Assim, surge a necessidade de desenvolver aços que apresentem boas características de usinabilidade e processamento, sem comprometer as propriedades mecânicas. Neste contexto, o aço C45 emerge como um protagonista neste estudo. Ele é escolhido devido às suas notáveis propriedades mecânicas e à complexidade envolvida na determinação dos parâmetros ideais de corte no torneamento interno a seco, visando otimizar sua usinabilidade. Este desafio é ainda mais evidente quando consideramos os diferentes estados de fornecimento do material, incluindo os tratamentos térmicos como o alívio de tensão e a normalização.

Neste estudo foi investigada a usinabilidade pelo processo de torneamento a seco no diâmetro interno em tubos sem costura trefilados a frio no aço C45 nos estados de fornecimento com tratamento térmico de normalização e de alívio de tensão, considerando os critérios de rugosidade, formação dos cavacos, desgaste e vida útil da ferramenta de usinagem, bem como possíveis efeitos dos estados de fornecimentos em alívio de tensão e normalização. Foram variadas as condições de corte como o avanço e a velocidade de corte, e foi mantida fixa a profundidade de corte.

O aço DIN C45 foi selecionado para este estudo devido à sua disponibilidade em escala de produção nacional, atendendo à demanda do mercado que, de outra forma, recorre à aquisição de matérias-primas e produtos importados fabricados com aços similares. Adicionalmente, o uso de tubos trefilados sem costura em aço DIN C45, aliado aos dados levantados no presente estudo, demonstrou a importância dessa escolha ao evidenciar a potencial competitividade do material selecionado em relação à concorrência que utiliza barras maciças de aço similar para essa aplicação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estudar a usinabilidade do aço DIN C45 por meio de torneamento a seco no diâmetro interno de tubos sem costura trefilados a frio nos estados de fornecimentos com tratamento térmico de normalização e com tratamento térmico de alívio de tensão, considerando a análise do desgaste de flanco do inserto de usinagem, a rugosidade da superfície usinada e a morfologia do cavaco de usinagem.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o material C45 nos estados de fornecimento normalizado e alívio de tensão por meio de análise da composição química, microestrutura, ensaios de dureza e tração;
- Estudar a influência dos parâmetros avanço e velocidade de corte no processo de torneamento interno a seco de tubos trefilados sem costura em aço C45, nos estados de fornecimento normalizado e alívio de tensão;
- Caracterizar os cavacos em relação ao tipo e forma;
- Mensurar o desgaste do inserto de usinagem em função do volume de material usinado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Os aços

Os aços representam ligas de ferro-carbono que podem incluir concentrações consideráveis de outros elementos de liga; existe uma ampla variedade de ligas com diferentes composições e/ou tratamentos térmicos. As propriedades mecânicas são sensíveis ao teor de carbono, geralmente inferior a 1,0 %. Alguns dos aços mais comuns são classificados com base na concentração de carbono: aços de baixo, médio ou alto teor de carbono. Dentro de cada grupo, há subclasses adicionais, distintas pelas concentrações de outros elementos de liga. Os aços-carbono comuns contêm apenas concentrações residuais de impurezas além do carbono, junto com um pouco de manganês. Nos aços-liga, mais elementos de liga são intencionalmente adicionados em concentrações específicas (CALLISTER, 2016).

3.2 Os aços com médio teor de carbono

De acordo com Callister (2016), os aços com médio teor de carbono apresentam concentrações de carbono entre aproximadamente 0,25 % e 0,60 % em peso. Para aprimorar suas propriedades mecânicas, essas ligas podem passar por tratamento térmico, envolvendo etapas como austenitização, têmpera e revenimento. Elas são frequentemente utilizadas na condição revenida, exibindo microestruturas de martensita revenida. Aços com médio teor de carbono possuem baixa temperabilidade e podem ser eficientemente tratados termicamente apenas em seções muito finas e com taxas de resfriamento extremamente rápidas. Adições de cromo, níquel e molibdênio aprimoram a capacidade dessas ligas de serem tratadas termicamente, resultando em diversas combinações de resistência mecânica e ductilidade. Quando submetidas a tratamento térmico, essas ligas apresentam resistência mecânica superior em comparação aos aços com baixo teor de carbono, embora com um comprometimento da ductilidade e tenacidade.

Na Tabela 1 é apresentada a classificação, juntamente com algumas características e aplicações, com base nos teores de carbono classificados como baixo ($\%C \leq 0,25$), médio ($0,25 < \%C \leq 0,60$) e alto ($0,60 < \%C \leq 1,40$) em termos percentuais em peso.

Tabela 1 - Classificação, características e aplicações de aços binários em função do teor de carbono

Classificação	Teor de carbono	Características	Aplicações
Aço baixo carbono (C)	$\%C \leq 0,25$	Dureza superficial e núcleo tenaz	Caixas para recozimento, engrenagens, etc.
Aço médio carbono (C)	$0,25 < \%C \leq 0,60$	Boa tenacidade e resistência	Indústria automotiva e ferroviária, implementos e máquinas agrícolas, construção civil, etc.
Aço alto carbono (C)	$0,60 < \%C \leq 1,40$	Elevada dureza e resistência quando temperado	Matrizes, cilindro de laminação, partes de máquina ferramenta, etc.

Fonte: Adaptado CALLISTER, 2016.

3.3 Classificação dos aços

De acordo com Chiaverini (2018), a identificação correta de um aço demandado, embora não seja suficiente, a análise de sua composição química. Isto é comumente expresso por meio de classificações ou códigos estabelecidos por organizações internacionais, sendo os mais relevantes o American Iron and Steel Institute (AISI) e o Deutsches Institut für Normung (DIN).

O sistema de classificação do AISI é amplamente adotado pela Society of Automotive Engineers (SAE) e é referenciado abreviadamente como AISI-SAE. Esse sistema consiste em uma série numérica de quatro ou cinco algarismos, em que os dois ou três últimos dígitos indicam o teor de carbono do aço em centésimos. Os dois primeiros dígitos indicam se o aço é ou não ligado e especificam o tipo de liga.

Segundo Chiaverini (2018), a norma DIN 17100 classifica os aços com base no seu limite de resistência a tração, enquanto a norma DIN 17200 classifica de acordo com a composição química. Os aços não ligados são identificados pela letra C seguida pelo seu teor de carbono expresso em centésimos. Estes materiais, cujos teores básicos de elementos decorrentes do processo de fabricação ($Si < 0,5 \%$, $Mn < 0,8 \%$, $Cu < 0,25 \%$ e $Al < 0,1 \%$, em peso), são classificados por uma letra C que indica sua composição como aço ao carbono, seguido por dois números que representam o teor de carbono dividido por 100. Adicionalmente, letras suplementares podem complementar a especificação (ex.: k = pequenos teores de P e S; G = recozido; N = normalizado; V = temperado e revenido; E = temperado e cementado; GS = aço fundido; etc.). Para ilustrar, o aço DIN C15 é identificado como aço ao carbono

contendo 0,15 % de carbono. Outro exemplo seria o aço DIN C45N, caracterizado como aço ao carbono com menores teores de P e S, apresentando 0,45 % de carbono no estado de fornecimento normalizado.

Na Tabela 2 observa-se a equivalência de alguns aços entre os sistemas de classificação DIN e SAE.

Tabela 2 - Equivalência dos aços conforme sistema DIN e SAE.

Aço SAE	Aço equivalente DIN
SAE1010	DIN C10
SAE1020	DIN C20
SAE1035	DIN C35
SAE1045	DIN C45

Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2022.

3.4 Tratamentos térmicos

3.4.1 Recozimento

Segundo Callister (2016), o recozimento é um procedimento que compreende o aquecimento do material a uma temperatura específica, mantendo-o nessa temperatura por um período para possibilitar a recuperação das propriedades do material. Posteriormente, o material é resfriado gradualmente para eliminar tensões internas, reduzir a dureza e aumentar sua ductilidade e tenacidade, e/ou produzir uma microestrutura específica. Esse tratamento térmico é frequentemente empregado em metais após processos de conformação a frio ou soldagem.

No presente estudo, foram utilizados corpos de prova que receberam previamente tratamentos térmicos de recozimento, tanto de normalização quanto para alívio de tensões.

3.4.2 Recozimento de normalização

Segundo Silva (2006), no tratamento térmico de normalização, o material é aquecido a uma temperatura acima da zona crítica, mantido nessa temperatura por um tempo e, em seguida, resfriado no ar. O tratamento de normalização é aplicado para a formação de uma estrutura mais refinada e homogênea no material, e produzir uma distribuição de tamanhos de grãos mais uniforme, aumentando sua resistência e tenacidade.

3.4.2.1 Recozimento para alívio de tensões

O recozimento para alívio de tensões é uma forma de tratamento térmico utilizado para reduzir ou eliminar as tensões internas que podem ter sido induzidas em um material devido a processos anteriores, como trefilação, soldagem, forjamento, usinagem ou outros tipos de deformação plástica. Durante esses processos, as mudanças na forma ou no tamanho do material podem criar tensões residuais. Essas tensões residuais podem ser prejudiciais, podendo causar deformações posteriores, diminuição da resistência do material, aumento da propensão à fratura, entre outros problemas (SILVA 2006).

O recozimento para alívio de tensões visa reduzir essas tensões internas, normalmente seguindo os seguintes passos:

1. **Aquecimento:** O material é aquecido a uma temperatura abaixo do limite inferior da zona crítica, suficientemente para permitir a redistribuição das tensões internas.
2. **Manutenção da temperatura:** Após atingir a temperatura desejada, o material é mantido nessa condição por um período de tempo para permitir que as tensões residuais diminuam gradualmente.
3. **Resfriamento lento:** O material é resfriado lentamente, muitas vezes no forno, para evitar o surgimento de novas tensões devido a um resfriamento rápido.

O processo de recozimento para alívio de tensões ajuda a relaxar a estrutura do material, reduzindo as tensões residuais sem afetar significativamente suas propriedades mecânicas.

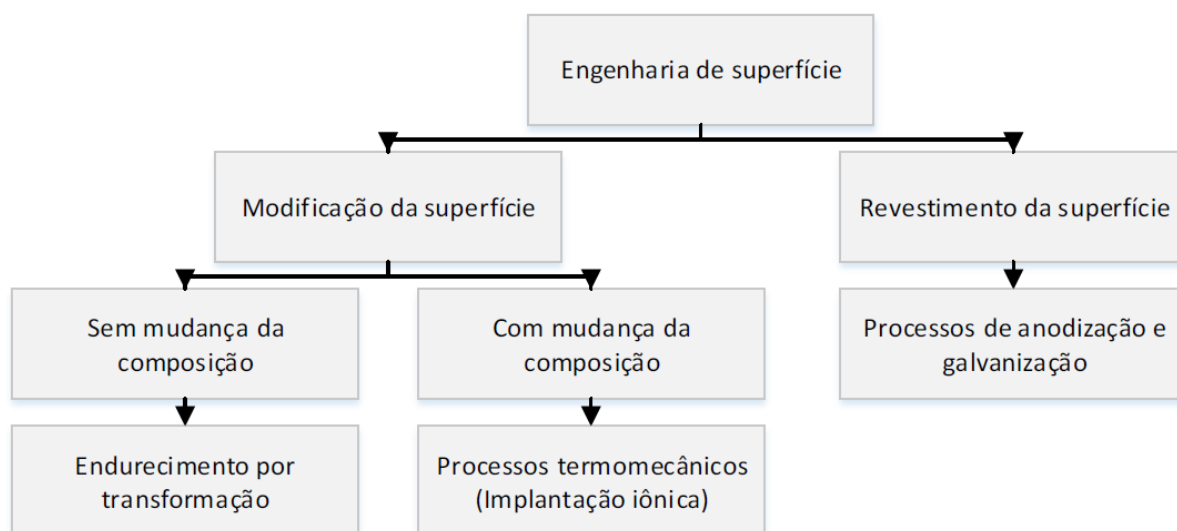
3.5 Engenharia de superfície e desgaste

A Engenharia de Superfície e o estudo do desgaste de materiais são áreas essenciais no campo da ciência dos materiais e engenharia mecânica, pois lidam com a modificação e análise das propriedades superficiais dos materiais para melhorar sua durabilidade, resistência ao desgaste, corrosão e outras características que afetam diretamente o desempenho e a vida útil dos componentes. A superfície de um material desempenha um papel crítico em sua interação com o ambiente circundante, influenciando diretamente suas propriedades mecânicas, químicas e físicas. A Engenharia de Superfície concentra-se em técnicas e métodos para modificar essa região superficial, seja através da aplicação de revestimentos, tratamentos térmicos, processos de deposição de materiais ou outros métodos avançados, com o intuito de aprimorar suas propriedades (BUDINSKI, 1988).

Segundo Stachowiak (2014), um dos principais focos da Engenharia de Superfície é a melhoria da resistência ao desgaste. O desgaste é um processo inevitável que ocorre quando duas superfícies entram em contato e há movimento relativo entre elas. Esse fenômeno pode resultar em perda de material, deformações ou até mesmo falhas catastróficas de componentes, afetando diretamente a eficiência e a confiabilidade dos sistemas mecânicos. Existem diversas abordagens para mitigar o desgaste, como a aplicação de revestimentos superficiais, tratamentos térmicos, endurecimento superficial, modificação química e métodos avançados de fabricação. Por exemplo, a deposição de filmes finos ou revestimentos cerâmicos pode melhorar significativamente a resistência ao desgaste, criando barreiras protetoras e reduzindo o atrito entre as superfícies. Além disso, a compreensão dos mecanismos de desgaste, como desgaste abrasivo, adesivo, erosivo, fadiga superficial e outros, desempenha um papel crucial na formulação de estratégias para mitigar esses efeitos indesejados. Estudar as condições operacionais, o ambiente de aplicação e os materiais envolvidos é fundamental para desenvolver soluções eficazes de engenharia de superfície.

O resumo simples dos métodos disponíveis que podem ser utilizados é descrito na Figura 1.

Figura 1 - Resumo dos métodos disponíveis na engenharia de superfície



Fonte: Adaptado de HUTCHINGS, 2017.

3.6 Torneamento

O torneamento é um processo de usinagem com remoção contínua de cavaco onde a peça gira sobre o eixo principal da máquina e uma ferramenta mono ou multicortante retira cavaco de sua periferia, deslocando-se no mesmo plano do eixo, com a finalidade de obter uma superfície de revolução definida.

Segundo Uemura et al. (2017), trata-se de um processo que tem por objetivo obter superfícies de revolução, com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes, por meio do movimento giratório da peça em torno do eixo principal de rotação da máquina, com deslocamento simultâneo da ferramenta, seguindo trajetória coplanar com o eixo da máquina, onde a ferramenta é ajustada a uma certa profundidade de corte e, ao mesmo tempo em que a peça gira, a mesma se desloca a uma determinada velocidade. Sendo o resultado desses movimentos, a formação do cavaco, que se move sobre a face da ferramenta. Podemos destacar algumas características do torneamento que não ocorrem em muitos outros processos de usinagem:

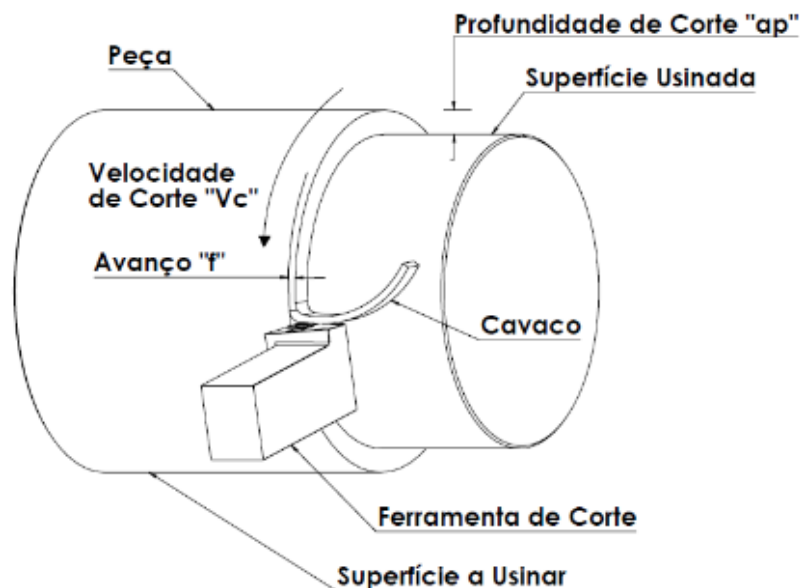
- O corte é normalmente contínuo;

- O processo de corte pode ser representado em coordenadas cilíndricas, onde as coordenadas polares descrevem a seção transversal da peça em rotação, e uma coordenada adicional de profundidade é utilizada para indicar o movimento da ferramenta. Durante o processo, ocorrem movimentos simultâneos da peça e da ferramenta, incluindo a rotação da peça e a translação da ferramenta.

A velocidade de corte (V_c) é a taxa na qual a superfície não cortada da peça passa pela aresta de corte da ferramenta, expressa normalmente em m/min. O avanço (f_n) é a distância percorrida pela ferramenta por revolução da peça, e a profundidade de corte (A_p) é a espessura ou profundidade de penetração da ferramenta medida perpendicularmente ao plano de trabalho, que é definido pelas direções de avanço e velocidade de corte da ferramenta (DINIZ, et. al. 2014).

Na Figura 2 é ilustrado as superfícies definidas sobre a peça e os parâmetros de corte presentes em um processo de torneamento cilíndrico externo.

Figura 2 - Parâmetros de corte e superfícies em torneamento cilíndrico externo



Fonte: Adaptado de DINIZ et al., 2014.

Para Sheng et al. (2017), os parâmetros de corte estão intimamente relacionados às ferramentas (geometria e propriedades do material), equipamentos de usinagem e materiais da peça. Portanto, é muito difícil estabelecer um modelo de otimização em conformidade com as condições reais de usinagem. Assim como

coordenar o controle do desgaste da ferramenta com outras metas, como qualidade da superfície usinada, precisão da peça usinada e tempo de produção, é uma questão fundamental na otimização do processo de corte.

3.7 Ferramentas de corte

As ferramentas de corte são componentes fundamentais nos processos de usinagem, desempenhando um papel essencial na remoção de material das peças. Elas são projetadas para cortar, perfurar, fresar, tornejar ou realizar outros movimentos específicos que moldam e refinam as peças conforme as exigências de projeto. Existem vários tipos de ferramentas de corte utilizadas em diferentes processos de usinagem, e cada uma tem suas características próprias (STOETERAU, 2015).

Aqui estão alguns tipos comuns de ferramentas de corte e suas aplicações:

1. **Fresas:** Utilizadas no fresamento para criar superfícies planas, contornos, entalhes e outros perfis em uma peça. Existem fresas de topo, fresas cilíndricas, fresas de topo esférico, entre outras, cada uma projetada para finalidades específicas.
2. **Brocas:** Empregadas na furação de materiais para criar furos precisos e de diferentes diâmetros. As brocas podem ter formatos variados, como brocas helicoidais, brocas de centro, brocas escalonadas, entre outras.
3. **Insertos de torneamento:** Utilizados em tornos para girar a peça e dar forma ao material. Esses insertos são fixados nas ferramentas de corte e podem ter diferentes geometrias para realizar operações como desbaste, acabamento, chanframento, entre outras.

As ferramentas de corte são construídas com materiais resistentes ao desgaste, como aços especiais, carbonetos de tungstênio, cerâmicas ou materiais cermet. Além disso, as geometrias das ferramentas são projetadas para otimizar o desempenho, o que inclui ângulos de corte, folgas, geometria dos dentes, entre outros fatores.

A escolha da ferramenta de corte correta depende do material a ser usinado, das características do processo de usinagem, das dimensões e especificações da peça a ser produzida, além das condições de corte desejadas. Uma seleção adequada

da ferramenta de corte é crucial para obter precisão, eficiência e qualidade na usinagem.

3.7.1 Geometria da ferramenta de corte

A geometria e a nomenclatura das ferramentas de corte, mesmo as ferramentas de corte de ponto único, são assuntos complexos. A operação de corte mais simples é aquela em que uma ferramenta de borda reta se move com uma velocidade constante na direção perpendicular à aresta de corte da ferramenta, retirando o excesso da superfície usinada e conseqüentemente formando o cavaco. Isso é conhecido como o processo de corte bidimensional ou ortogonal (STOETERAU, 2015).

De acordo com Stoeterau (2015), os processos de usinagem se classificam quanto ao tipo de ferramenta utilizada para retirada do material da peça conforme é mostrado na Tabela 3.

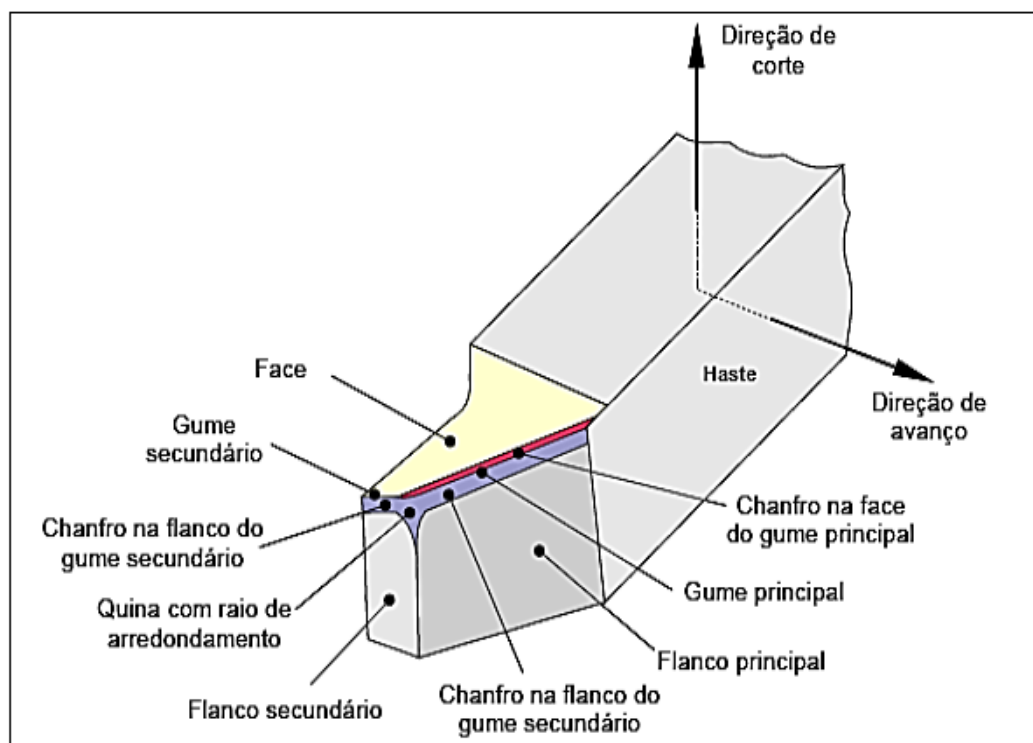
Tabela 3 - Classificação dos processos de usinagem conforme tipo de ferramenta utilizada para retirada do material da peça.

Tipos de ferramenta	Tipos de processo
Ferramenta de geometria definida	Tornear, fresar, furar, rosquear, alargar, brochar, serrar, plainar, outros.
Ferramenta de geometria não definida	Retificar, brunir, lapidar, lixar, polir, jatear, tamborear, outros.
Processos não convencionais	Remoção térmica, remoção química, remoção eletroquímica, remoção por ultrassom, remoção por jato d'água, outros.

Fonte: Adaptado de STOETERAU, 2015.

De acordo com Stoeterau (2015), a geometria da ferramenta exerce influência na formação do cavaco, na saída do cavaco, nas forças de corte, no desgaste da ferramenta e na qualidade final do trabalho, ou seja, no resultado do acabamento da superfície usinada. Na Figura 3 é ilustrado um modelo de ferramenta de tornear com as suas características.

Figura 3 - Parâmetros de corte e superfícies em torneamento cilíndrico externo



Fonte: Adaptado de STOETERAU, 2015.

3.7.2 Seleção da ferramenta

A escolha adequada do material da ferramenta de usinagem é essencial para otimizar a eficiência do processo, a qualidade da peça produzida e a durabilidade da própria ferramenta, minimizando custos e maximizando a produtividade.

A seleção do material de ferramenta a ser empregado é feita com base em uma série de fatores. A seguir são apresentados alguns dos critérios mais relevantes (DINIZ, et. al. 2014):

- Dureza do material a ser usinado;
- Tipo de cavaco gerado pelo material a ser usinado;
- Processo de usinagem, ou seja, corte interrompido (fresamento), corte contínuo (torneamento), lubrificação do corte, tempo de ciclo, acabamento ou desbaste;
- Condições da máquina em termos de rigidez (sem folgas/vibrações), potência, controles durante o processo (in process), sistema de refrigeração das Ferramentas;
- Forma e dimensão da ferramenta;

- O custo do material da ferramenta é fundamental para a escolha do mesmo, ou seja, sempre se buscará um material alternativo de menor custo;
- Parâmetros de usinagens como velocidade de corte, profundidade de corte e avanço;
- Características finais do produto, tais como: qualidade superficial e dimensional requerida.

Diniz et. al. (2014) ressalta a importância de que a ferramenta de corte demonstre algumas características e que em função da aplicação uma ou mais propriedades devem se destacar em relação às outras:

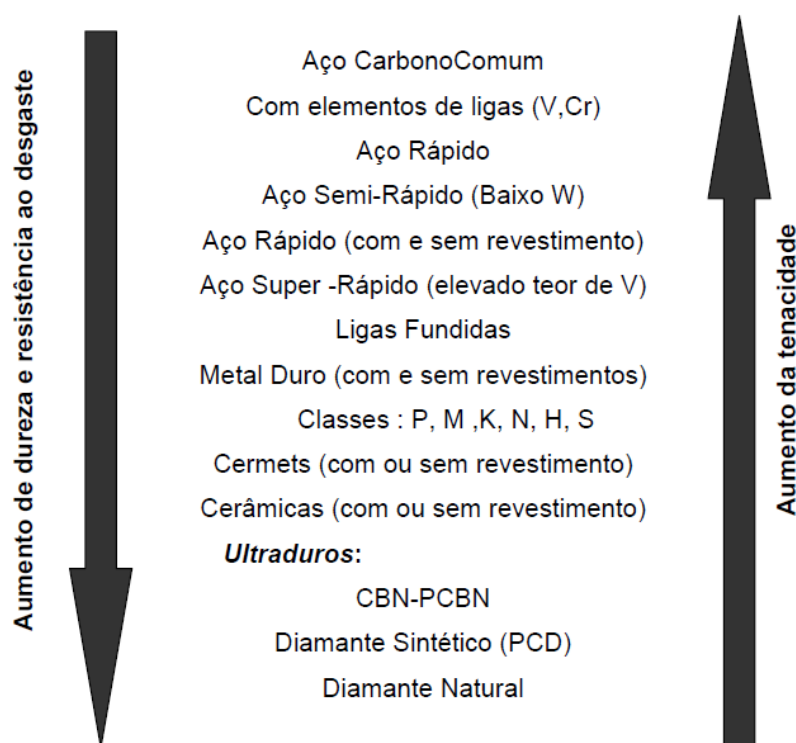
- Alta dureza (principalmente à quente);
- Tenacidade (suficiente para evitar falhas por rupturas);
- Alta resistência ao desgaste;
- Alta resistência a compressão e ao cisalhamento;
- Boas propriedades mecânicas e térmicas, isto é muito importante principalmente para a dureza a quente do material;
- Boa condutividade térmica;
- Baixo índice de expansão volumétrica;
- Alta resistência ao choque térmico;
- Estabilidade química para evitar o desgaste por difusão.

3.7.3 Materiais para ferramentas de usinagem

Os materiais predominantes empregados em ferramentas de corte incluem o metal duro com ou sem revestimento, aços rápidos (HSS) com ou sem revestimento, nitreto de boro cúbico (CBN), material cerâmico, diamante, entre outros. No contexto das operações de usinagem, os mais comuns são o metal duro e o aço rápido, dentro dos grupos mencionados.

Na Figura 4 observa-se a relação das ferramentas de corte e algumas propriedades. À medida que se desce na lista dos tipos de materiais, se ganha em dureza (ou resistência ao desgaste) e perde-se em tenacidade, e vice-versa.

Figura 4 - Relação dos materiais para ferramenta de corte e as respectivas propriedades



Fonte: SANTOS e SALES, 2013.

Um avanço significativo na esfera dos materiais destinados a ferramentas de usinagem foi o surgimento do metal duro, conhecido também como Widia e comumente referido como carboneto de tungstênio (WC), por volta de 1890. A incorporação de elementos como Cobalto, Tungstênio e Cromo viabilizou a fabricação de ferramentas capazes de operar em velocidades de corte superiores às utilizadas na usinagem com aço rápido.

Os metais duros são produzidos através do processo de metalurgia do pó, empregando partículas de carbonetos de metais refratários de alta dureza, finamente pulverizadas e posteriormente sinterizadas com um ou mais metais pertencentes ao grupo do ferro, como ferro, níquel ou cobalto. Esse procedimento resulta na formação de uma estrutura de elevada dureza e resistência à compressão. O metal aglutinante é predominantemente composto por Cobalto. Uma característica de extrema importância no metal duro é o tamanho das partículas dos carbonetos de metais refratários. Partículas maiores conferem maior tenacidade, enquanto partículas menores contribuem para a obtenção de um metal duro mais rígido e resistente.

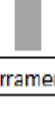
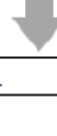
De acordo com Machado et. al (2009), a primeira ferramenta elaborada com metal duro, originada na Alemanha, consistia exclusivamente de WC+Co e revelou-se altamente eficiente na usinagem de Ferros Fundidos Cinzentos. Entretanto, apresentou uma resistência insuficiente à craterização quando utilizada para usinar aços. Para contornar essa limitação, foram adicionados TiC, TaC e/ou NbC ao composto WC+Co, resultando na redução dos problemas associados à craterização durante a usinagem de aços. As razões subjacentes a essa melhoria foram:

- O carboneto adicionado (titânio, tântalo e/ou nióbio) tem maiores durezas que o WC e, portanto, apresentam maiores resistências ao desgaste;
- A solubilidade dos carbonetos adicionados no ferro é muito menor que o WC, isto inibe a difusão, que é um mecanismo de desgaste comum a altas temperaturas;
- A estabilidade dos carbonetos adicionados é maior que os WC. Isto implica em maiores dificuldades de dissolução e difusão desses elementos.

O metal duro tem a capacidade de realizar a usinagem de materiais cuja dureza seja inferior a 45 HRC. Existem diversas formulações disponíveis, sendo que cada liga é customizada para atender a requisitos específicos de aplicação. Dessa forma, ferramentas com alta dureza são empregadas em procedimentos de acabamento, enquanto ferramentas com boa tenacidade são utilizadas em operações de desbaste mais exigentes (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

A norma ABNT NBR ISO 513 (2013) estabelece uma classificação dos metais duros destinados à usinagem para insertos com arestas de corte definidas, divididos em classes P, M, K, N, H e S, de acordo com o material da peça a ser usinada, conforme é mostrado na Tabela 4. Cada classe de metal duro é designada por uma letra específica, seguida de um número que representa as propriedades de tenacidade e resistência ao desgaste da ferramenta. Estes números geralmente variam entre 01 e 50, sendo que um número maior indica maior tenacidade da ferramenta e menor resistência ao desgaste.

Tabela 4 - Classificação dos metais duros

Principais classes			Classes de aplicação	
Letra de identificação	Cor de identificação	Materiais a serem usinados	Metais duros	a b
P	Azul	Aços: Todos os tipos de aços e aços fundidos, exceto aços inoxidáveis com estrutura austenítica	P01 P10 P05 P20 P15 P30 P25 P40 P35 P50 P45	 
M	Amarelo	Aço Inoxidável: aço inoxidável austenítico e aço duplex (austenítico/ferrítico) e aço fundido	M01 M10 M05 M20 M15 M30 M25 M40 M35	 
K	Vermelho	Ferro fundido: Ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafita esferoidal, ferro fundido maleável	K01 K10 K05 K20 K15 K30 K25 K40 K35	 
N	Verde	Metais não ferrosos: Alumínio e outros metais não ferrosos, materiais não metálicos	N01 N10 N05 N20 N15 N30 N25	 
S	Marrom	Superligas e titânio: Ligas especiais resistentes ao calor à base de ferro, níquel e	S01 S10 S05 S20 S15 S30 S25	 
H	Cinza	Materiais duros: Aços endurecidos, ferros fundidos endurecidos, ferros	H01 H10 H05 H20 H15 H30 H25	 

a - Aumento da velocidade de corte, aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta.

b - Aumento do avanço, aumento da tenacidade do material da ferramenta.

Fonte: Adaptado da norma NBR ISO 513, 2013

A norma ABNT NBR ISO 513 (2013) considera primordialmente a composição química, as propriedades de dureza e tenacidade do material. Contudo, essa norma pode ser suplantada pela classificação específica determinada por um fabricante de ferramentas de metal duro. De acordo com essa perspectiva, um determinado material pode abranger uma ampla gama com resultados muito similares, conforme a classificação estabelecida pela mesma norma. Além disso, um único produto pode estar relacionado a mais de uma classe. Em vista disso, os fabricantes estão

enfatizando mais a finalidade da ferramenta do que a própria essência da classificação original (MACHADO et al., 2009).

- **Classe P**

Essa classe é mais conhecida como classe dos aços ou cavaco longos as ferramentas de Metal Duro desta classe possuem em sua matriz elevado teores de Carboneto de Titânio (TiC), Carboneto de Tântalo (TaC) e/ou Carboneto de Nióbio (NbC). Estes carbonetos conferem ao Metal Duro elevada resistência ao desgaste e elevada dureza, isto permite a usinagem de materiais que produzem cavacos mais longos os quais formam uma área de contato (maior atrito) bem maior com a superfície de saída da ferramenta (SANTOS; SALES, 2013).

- **Revestimentos para as os insertos de usinagem**

Com o intuito de aprimorar o desempenho das ferramentas de corte durante as operações de usinagem, foram concebidos revestimentos destinados a essas ferramentas. Segundo Diniz et al. (2014), a principal finalidade desses revestimentos é aprimorar a resistência ao desgaste da ferramenta na área em contato com a peça e o cavaco, enquanto o núcleo da pastilha mantém as propriedades de tenacidade características do metal duro convencional (WC + Co). Essa abordagem frequentemente possibilita um notável prolongamento da vida útil da ferramenta e uma redução nos esforços empregados no corte, em muitas circunstâncias.

Conforme divulgado pela Sandvik Coromant (2023), as pastilhas de metal duro com revestimento representam entre 80 % e 90 % das pastilhas empregadas atualmente. A utilização de revestimentos nas ferramentas tornou-se viável devido ao aprimoramento das técnicas de aplicação. Esses revestimentos são aplicados por meio de duas técnicas distintas: a deposição química de vapor (CVD) e a deposição física de vapor (PVD). Esta distinção é descrita pela Sandvik Coromant (2023) da seguinte maneira:

A técnica de deposição química de vapor (CVD) envolve reações em temperaturas situadas na faixa entre 700°C e 1050°C. Os revestimentos produzidos por essa técnica exibem alta resistência ao desgaste e apresentam excelente aderência ao metal duro. Dentre os revestimentos mais proeminentes estão o TiC, TiCN, Al₂O₃ e TiN.

O método de deposição física de vapor (PVD) ocorre em temperaturas comparativamente mais baixas, variando entre 400°C e 600°C. Esse processo implica na evaporação de um metal que, por exemplo, reage com o nitrogênio, resultando na

formação de uma camada resistente na superfície da ferramenta de corte. Esses revestimentos oferecem incremento na resistência ao desgaste e são especialmente indicados para arestas de corte robustas e afiadas, além de serem recomendados para materiais com propensão à abrasão. Entre os principais revestimentos, destacam-se o TiCN, TiN e TiAlN.

As ferramentas de corte empregadas neste estudo consistem em pastilhas de metal duro revestidas com TiAlN na Classe P10. Segundo Diniz et al. (2014), as características primordiais desses revestimentos englobam:

- Incremento significativo na resistência à oxidação, viabilizando a utilização em temperaturas mais elevadas. Quando oxidado, forma-se uma camada de Al_2O_3 que é quimicamente inerte, resultando em considerável resistência à difusão e oxidação.
- Baixa condutividade térmica, proporcionando proteção à aresta de corte e ampliando a dissipação de calor através do cavaco.
- Elevada dureza tanto em condições de temperatura elevada quanto baixa.
- Alta estabilidade química, reduzindo o desgaste de cratera.
- Baixo coeficiente de atrito.

3.8 Usinabilidade dos materiais

O conceito de usinabilidade abarca todas as propriedades de um material que exercem influência no processo de usinagem, abordando as dificuldades enfrentadas ao usar esse material. A usinabilidade é influenciada pelo estado metalúrgico da peça, suas propriedades mecânicas, composição química, operações prévias (sejam elas a quente ou a frio) e eventuais níveis de encruamento. Adicionalmente, está sujeita às condições durante a usinagem, às características da ferramenta, às condições de refrigeração, à estabilidade do sistema máquina-ferramenta-dispositivo de fixação e aos tipos de operações realizadas pela ferramenta. Além de ser uma métrica tecnológica, a usinabilidade também está associada a aspectos econômicos, especialmente no que tange ao custo de fabricação por unidade produzida (FERRARESI, 2014).

Embora a dureza e a resistência mecânica sejam considerações importantes que influenciam na usinabilidade dos materiais, outros fatores desempenham um papel crucial nesse contexto. Elementos como a introdução controlada no aço de

inclusões, sejam elas metálicas ou não metálicas, e aditivos para aprimorar a usinabilidade, a quantidade de partículas duras presentes, a microestrutura do material, bem como a propensão ao empastamento do cavaco na região de saída da ferramenta, entre outros, desempenham um papel significativo (DINIZ ET. AL.; 2014). Na Tabela 5 observa-se algumas das diversas técnicas investigadas com esse propósito.

Tabela 5 - Tecnologias aplicadas para melhoria da usinabilidade.

Aplicação	Características	Resultados
Sulfetos controlados	Controlar fator de forma dos sulfetos	Aumento da usinabilidade em velocidades de corte baixas
Óxidos controlados	Tratamento ao cálcio	Aumento da usinabilidade em velocidades de corte altas
Baixo oxigênio	Evitar formação de inclusões abrasivas	Aumento da usinabilidade
Pb / Bi / inclusões metálicas	Formar inclusões metálicas	Aumento da usinabilidade em velocidades baixas e médias
Se / Te / aditivos	Sulfetos controlados	Aumento da usinabilidade em velocidades de corte baixas
	Óxidos visco-plásticos	Aumento da usinabilidade em velocidades de corte altas

Fonte: Evangelista, 2003.

Estas tecnologias podem ser aplicadas isoladamente ou de forma combinada, dependendo dos resultados objetivados.

Características como dureza, resistência mecânica, ductilidade, condutividade térmica e taxa de encruamento também exercem influência na usinabilidade dos materiais.

Uma importante propriedade a ser considerada é o fenômeno do encruamento, que surge quando os metais sofrem deformação plástica, resultando no aumento de sua resistência. Uma taxa elevada de encruamento indica um notável aumento na resistência do material. Em outras palavras, um material com alta taxa de

encruamento demanda uma considerável quantidade de energia para formar o cavaco, ocasionando um grande aumento de dureza em uma camada superficial durante o processo de usinagem (DINIZ ET. AL.; 2014).

Conforme Ferraresi (2014), por meio de tratamentos térmicos específicos, é possível modificar a estrutura de um material em relação à quantidade, forma e distribuição das segregações. Isso pode resultar em influências positivas tanto na resistência quanto na usinabilidade do material.

3.9 Ensaios de usinabilidade

Devido ao grande número de parâmetros de usinabilidade, um material pode apresentar usinabilidade melhor que outro segundo um determinado critério e pior em relação a outro critério.

Segundo Mills e Redford (1983) os testes de usinabilidade são classificados nas seguintes categorias básicas e estão representados esquematicamente na Figura 5:

Dois grupos:

- a) Ensaios que requerem usinagem. Teste de pressão constante, teste de faceamento rápido, teste de torneamento cônico e teste de desgaste da ferramenta de corte são alguns exemplos de ensaios que requerem usinagem.
- b) Ensaios que não requerem usinagem. Nos ensaios que não requerem usinagem a usinabilidade é obtida com base na composição química, microestrutura e propriedades físicas do material da peça usinada.

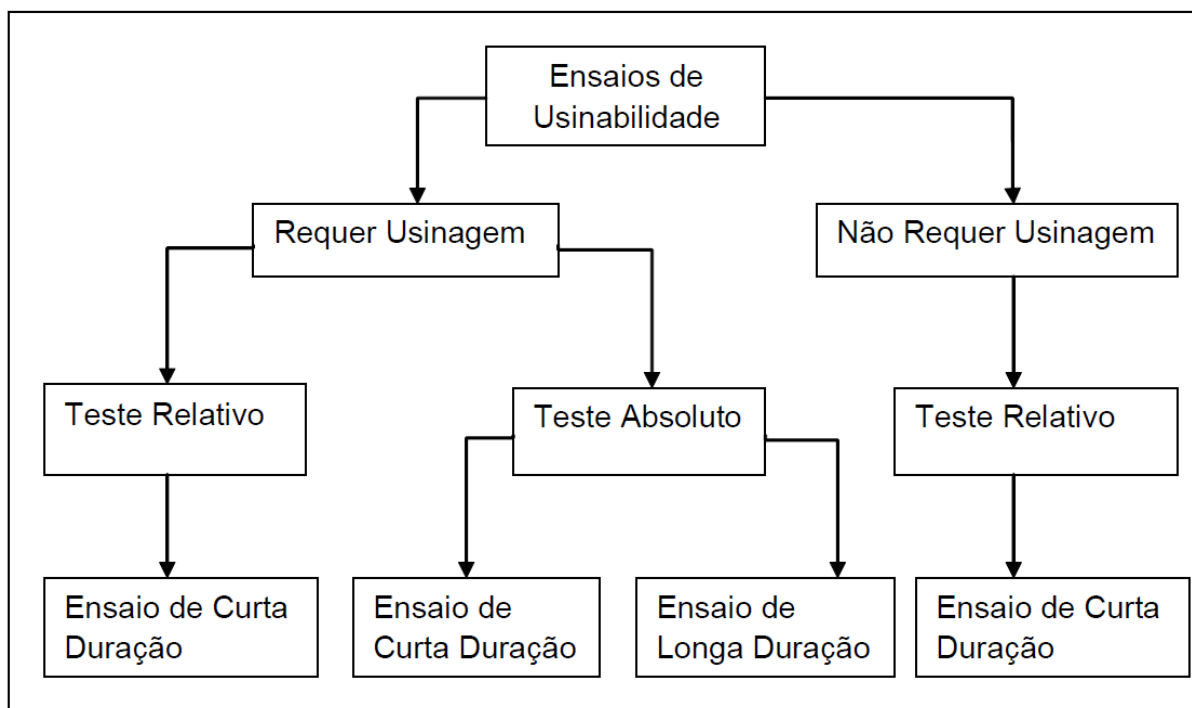
Dois subgrupos:

- a) Testes de ranqueamento (“ranking tests”) ou testes relativos ou testes classificatórios. Indicam a usinabilidade relativa entre duas ou mais combinações de pares de peça-ferramenta, para uma dada condição de corte estabelecida;
- b) Testes absolutos. Indicam os méritos relativos de duas ou mais combinações de pares de peça-ferramenta, para uma dada faixa de condições de corte.

Neste estudo, foi empregado o teste absoluto, o qual usualmente é válido para diversas velocidades de corte. Em outras situações, esse teste pode também

considerar variações em outras condições de corte como no avanço e na geometria da ferramenta.

Figura 5 - Classificação dos ensaios de usinabilidade



Fonte: MILLS e REDFORD, 1983

3.10 Desgaste e avarias nas ferramentas de corte

São variados os tipos de desgastes e avarias que podem ocorrer em uma ferramenta de usinagem, e é crucial distingui-los antes de defini-los. O desgaste refere-se à perda progressiva e microscópica de partículas da ferramenta com a alteração na sua forma a partir de sua forma original, resultante da ação do corte. Por outro lado, outros tipos de deterioração são categorizados como avarias (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Segundo Gonçalves (2011), pode-se estabelecer que:

- a) A perda da eficácia de corte é originada pelo desgaste ou pela ocorrência de avarias. A avaria decorre de condições extremas impostas à ferramenta de corte, como operações em condições acima das recomendações, vibrações ou impactos mecânicos. O desgaste, por sua vez, é resultado da remoção progressiva de material da ferramenta, um processo

influenciado pelo tipo de material da peça de trabalho, natureza da operação, rigidez da máquina, resistência na interface entre a peça e a ferramenta, velocidade de corte e avanço.

- b) Quando o desgaste da ferramenta se torna predominante em relação às avarias, critérios (valores limites) podem ser estabelecidos. Acima desses limites, a rugosidade da peça torna-se insatisfatória, as tolerâncias dimensionais da peça não podem ser preservadas, ou os esforços de corte se elevam a ponto de resultar em valores críticos de potência e danos na estrutura da ferramenta devido ao aumento da temperatura de corte.
- c) Nas operações de desbaste, os limites dos desgastes são mais elevados, sendo influenciados por fatores como a quebra da aresta de corte, o incremento das forças de usinagem, as vibrações provenientes do conjunto máquina-ferramenta-peça, ou até mesmo sobrecargas no sistema de acionamento.

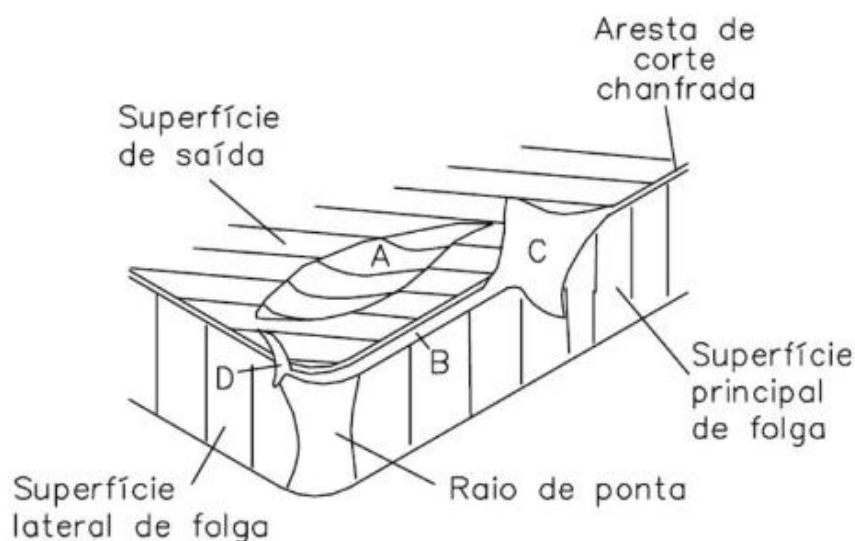
As medições dos desgastes das ferramentas podem ser realizadas tanto de maneira direta quanto indireta. A abordagem direta pode ocorrer na oficina por meio de instrumentos como lupa ou relógio comparador, em ambiente laboratorial utilizando microscópios ou perfilômetros, e até mesmo diretamente na máquina por meio de sensores de fibras ópticas. Por outro lado, a medição indireta pode ser efetuada na própria peça usinada, por meio de instrumentos de medição como paquímetros ou micrômetros, para avaliar dimensões esperadas, ou através da mensuração da rugosidade por meio de rugosímetros de apalpamento, instrumentação óptica ou digitalização de imagem.

3.10.1 Tipos de desgaste

Na Figura 6 está ilustrado as principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte, permitindo a distinção de pelo menos três modalidades de desgaste:

1. Área A – desgaste de cratera;
2. Área B – desgaste de flanco;
3. Áreas C e D – desgaste de entalhe.

Figura 6 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte



Fonte: Adaptado de DEARNLEY e TRENT,1982

- Desgaste de cratera

O desgaste de cratera é uma das ocorrências mais comuns na superfície de saída do inserto de corte. De acordo com a Sandvik Coromant (2023), esse tipo de desgaste se origina devido à difusão e às elevadas temperaturas presentes na superfície de saída da ferramenta de corte. Além disso, pode ser provocado pelo desgaste abrasivo gerado pelo cavaco durante seu deslizamento sobre a superfície da ferramenta de corte, conforme observado por Bjurka (2011).

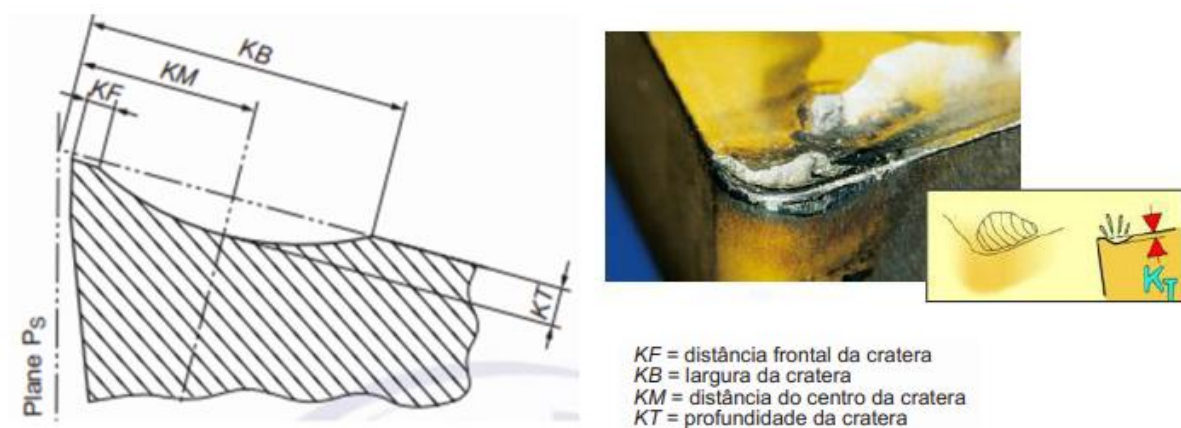
A profundidade da cratera, representada por KT , pode ser empregada como uma métrica para avaliar o desgaste da ferramenta. Conforme a norma NBR ISO 3685 (2017), um valor pré-definido de KT pode ser selecionado como critério para determinar a vida útil da ferramenta.

A localização da cratera em relação à aresta de corte também possui significância. Uma cratera profunda, situada distante da aresta de corte, pode ter um impacto menos prejudicial na ferramenta em comparação a uma cratera menos profunda e estreita próxima da aresta de corte.

A distância entre a borda da cratera e a aresta de corte principal, denominada KF , ocasionalmente serve como um critério útil para evitar falhas catastróficas, desde que seja aplicado de forma restrita.

Para propósitos específicos, é possível medir a distância do centro da cratera (KM) e a largura da cratera (KB) como informações suplementares. Contudo, não é aconselhável utilizá-las como critérios para determinar a vida útil da ferramenta. Na Figura 7 observa-se as características do desgaste de cratera.

Figura 7 - Desgaste de cratera

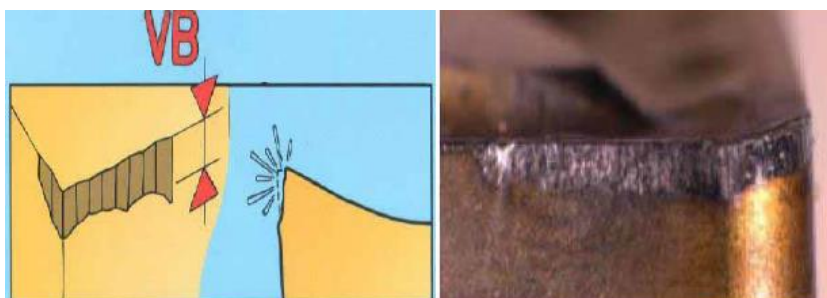


Fonte: Adaptado de NBR ISO 3685, 2017 e SANDVIK COROMANT, 2010.

- Desgaste de flanco ou desgaste na superfície de folga

Ocorre na superfície de folga da ferramenta como resultado do atrito entre a peça trabalhada e a ferramenta. Quando este desgaste se manifesta, ele tende a aumentar a rugosidade da superfície e a modificar as dimensões, podendo a peça desviar-se dos parâmetros de tolerância preestabelecidos. Conforme a norma NBR ISO 3685 (2017), o desgaste na superfície de folga ou flanco é designado pela sigla VB. Na Figura 8 é mostrado um exemplo do desgaste de flanco.

Figura 8 - Desgaste de flanco ou na superfície de folga



Fonte: MANUAL TÉCNICO DE USINAGEM SANDVIK, 2010

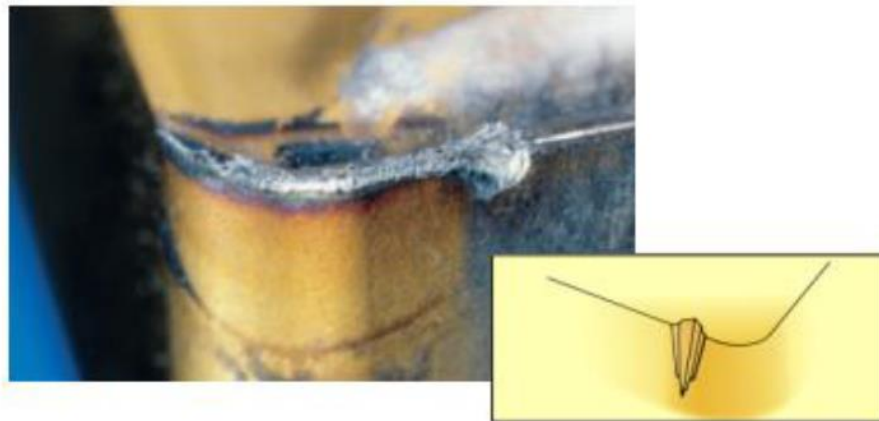
Segundo a norma NBR ISO 3685 (2017), este fenômeno representa o tipo mais conhecido de deterioração na ferramenta de corte. Em várias situações, a fase de desgaste do flanco exibe uma largura uniforme ao longo da seção média da borda reta da aresta principal. A mensuração da largura da fase de desgaste do flanco é geralmente de execução fácil. O aumento progressivo na largura desta fase acarreta numa degradação na eficiência da ferramenta. Todos os materiais empregados em ferramentas de corte normalmente demonstram uma alta taxa inicial de desgaste do flanco, a qual tende a diminuir após um breve período de uso, a menos que sejam aplicadas velocidades de corte excessivas. A medida da largura da fase de desgaste do flanco, VB_B máx., representa uma adequada avaliação do desgaste da ferramenta, e um valor predeterminado de VB_B máx. é considerado um critério sólido para a vida útil da ferramenta.

- Desgaste de entalhe

Este fenômeno representa um tipo especial desgaste de flanco que se combina com o desgaste na superfície de saída. Este tipo de desgaste ocorre adjacente, mas fora do ponto em que a aresta principal de corte se encontra com a superfície de trabalho. Em certas situações, esse desgaste pode demandar a substituição da ferramenta. O perfil e o comprimento do desgaste de entalhe, conhecido como VB_N , estão diretamente relacionados com a extensão e a precisão da repetição do ajuste de profundidade. Por estas razões, o desgaste de entalhe é excluído da avaliação da largura da fase de desgaste do flanco. Contudo, em situações excepcionais em que o desgaste do entalhe se torna o fenômeno de desgaste predominante sobre todos os outros na ferramenta, o comprimento do entalhe de desgaste pode ser empregado como um indicador do desgaste da ferramenta. Nessas circunstâncias, o valor de VB_N pode ser adotado como um critério válido para a vida útil da ferramenta (AMORIM, 2002).

O desgaste de entalhe nas ferramentas de corte é frequentemente causado por efeitos de endurecimento ou encruamento na peça de trabalho por meio das passadas prévias da ferramenta. O desgaste de entalhe pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Desgaste de entalhe



Fonte: SANDVIK COROMANT, 2010.

3.10.2 Critério da vida útil das ferramentas (insertos de usinagem)

Conforme descrito por Ferraresi (1977), a vida útil da ferramenta corresponde ao período em que ela opera de maneira eficaz, mantendo sua capacidade de corte intacta ou até alcançar um critério predefinido de término de vida útil ou até a ocorrência de um fenômeno específico.

Machado et al. (2009) afirma que os elementos que influenciam a determinação de um desgaste específico, e por conseguinte a vida útil da ferramenta, compreendem:

- a) O desgaste da superfície de saída da ferramenta atinge proporções tão significativas que pode levar à quebra da cunha de corte;
- b) Os desgastes podem alcançar temperaturas tão elevadas devido ao atrito, que a temperatura na região de contato cavaco e ferramenta de corte se aproxima do ponto em que a ferramenta perde sua capacidade de corte.
- c) O desgaste na superfície de folga da ferramenta compromete a manutenção das tolerâncias dimensionais especificadas para a peça;
- d) A perda da qualidade do acabamento superficial da usinada não atende mais aos critérios de qualidade estabelecidos;
- e) Aumento no tamanho das rebarbas;
- f) O desgaste resultante do incremento da força de usinagem exigida afeta o desempenho da máquina;
- g) Aumento no nível de ruído gerado;
- h) Crescimento na intensidade de vibração;

i) Outros elementos relevantes.

Após estabelecer um critério específico para o fim da vida útil da ferramenta de corte, como exemplificado na norma NBR ISO-3685 (2017), ou com base em experiências anteriores acumuladas, a duração da vida útil da ferramenta pode ser quantificada de diversas maneiras:

- a) Número de unidades de peças produzidas;
- b) Extensão efetiva de corte (em mm, m, km);
- c) Velocidade de corte para um determinado período de vida;
- d) Desgaste da ferramenta de corte;
- e) Volume de material removido;
- f) Outros métodos pertinentes

O método de determinação da vida útil por meio do desgaste da ferramenta de corte é considerado um dos mais eficientes entre os testes de usinabilidade. Esse ensaio, padronizado pela norma NBR ISO 3685 (2017), consiste na operação de torneamento em corpos de prova, interrompida periodicamente para avaliar o desgaste da ferramenta. Este processo é repetido continuamente até que o desgaste atinja um limite previamente estabelecido, indicando o término da vida útil da ferramenta. Na Tabela 6 é mostrado os critérios estipulados pela norma NBR ISO 3685 (2017). Neste estudo adotou-se o critério do desgaste de flanco médio (V_B) 0,30 mm como parâmetro de análise.

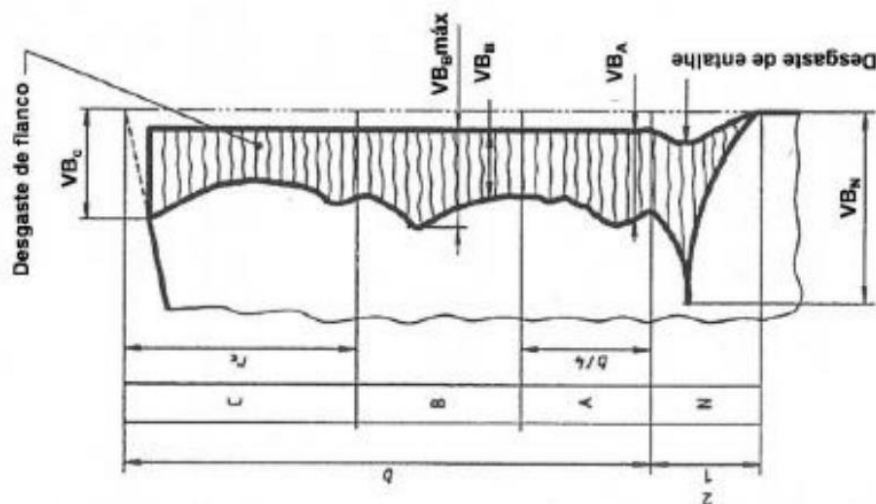
Tabela 6 - Critérios de fim de vida mais utilizados para ferramentas de carbeto sinterizado (metal duro)

Critérios de fim de vida útil da ferramenta de corte	
Desgaste de flanco médio (V_B)	03 mm
Desgaste de flanco máximo ($V_{Bmáx.}$)	0,6 mm
Profundidade de cratera (KT)	0,06+0,3.f
Falha catastrófica	Sulfetos controlados

Fonte: Adaptado de NBR ISO 3685, 2017

Para o propósito das medições do desgaste, a aresta de corte principal é considerada dividida em quatro zonas C, B, A e N, conforme é ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Zonas para caracterização dos desgastes de ferramentas de torneiar



Fonte: Adaptado de NBR ISO 3685, 2017

Zona C = É a zona do raio da ponta, é a parte curva da aresta de corte no canto da ferramenta.

Zona B = É a parte reta restante da aresta principal de corte entre a zona C e zona A.

Zona A = É o quarto do comprimento da aresta de corte desgastada “b” mais distante do raio de canto da ferramenta.

Zona N = Estende para além da área de contato mútuo entre a ferramenta e a peça para cerca de 1 mm a 2 mm ao longo da aresta de corte principal. É a região do desgaste de entalhe.

VB_B máx. = Largura máxima do desgaste do flanco 0,60 mm, se o desgaste do flanco não for regular na zona B.

VB_B = Largura média do desgaste do flanco 0,30 mm, se o desgaste do flanco for regular na zona B.

VB_A = Largura do desgaste abrasivo

VB_N = Largura do desgaste de entalhe

b = Comprimento do flanco da ferramenta

3.10.3 Qualidade da superfície usinada

A integridade superficial é definida como a avaliação da qualidade da superfície usinada, abrangendo não apenas as características superficiais, mas também as alterações subsuperficiais e o acabamento da peça. Essa avaliação é determinada por parâmetros como rugosidade e tolerância dimensional, entre outros aspectos

relevantes. A obtenção de superfícies acabadas sem irregularidades representa um desafio nos processos de usinagem convencionais, uma vez que tais imperfeições são inerentes à forma como o material é removido durante o corte. As altas tensões de cisalhamento, as temperaturas elevadas e as vibrações originadas pelo equipamento durante o processo, entre outros elementos, são responsáveis por gerar superfícies com maior rugosidade. Apesar dos esforços em busca de atingir uma superfície final lisa e uniforme, é inevitável a presença de irregularidades (AMORIM, 2002).

De acordo com Machado et al. (2009), a qualidade final de uma superfície usinada é determinada por um processo complexo que engloba diversos fenômenos, como deformações plásticas, rupturas, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e, ocasionalmente, reações químicas. Essa multiplicidade de elementos torna a avaliação da qualidade superficial um procedimento desafiador, pois há uma interação significativa entre muitos fatores.

A relevância da qualidade da superfície usinada é fundamentada em diversos aspectos, incluindo precisão e tolerância, especialmente em aplicações que envolvem peças com acoplamentos onde tanto o furo quanto o eixo estão em movimento relativo. Superfícies com maiores irregularidades, ou seja, apresentando valores mais altos de rugosidade, tendem a sofrer desgaste mais acentuado em comparação com aquelas que possuem um melhor acabamento, conforme indicado por Amorim (2002).

3.10.3.1 Rugosidade

A avaliação da qualidade de uma superfície é fortemente influenciada pela sua rugosidade superficial, tornando-se um dos principais fatores a serem considerados.

Conforme descrito por Machado et al. (2015), a rugosidade consiste em irregularidades finas geradas pelo processo de corte, que englobam marcas de avanço, formação de arestas, desgaste da ferramenta, e outros fenômenos. A textura superficial de uma peça produzida é impactada pela metodologia de fabricação, pela configuração da ferramenta e pelos diferentes parâmetros envolvidos no processo de corte.

A avaliação da rugosidade é realizada por meio de diversos parâmetros, os quais podem ser categorizados em:

- Amplitude: refere-se às alturas dos picos, profundidade dos vales, ou por ambos;
- Espaço: refere-se ao espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície;
- Híbrido: constitui uma combinação dos parâmetros de amplitude e espaço.

Segundo Amorim (2002), a rugosidade desempenha um papel crucial no comportamento dos elementos mecânicos, exercendo influência em diversos aspectos, tais como:

- Precisão e tolerância;
- Qualidade de deslizamento;
- Resistência ao desgaste;
- Capacidade de ajuste do acoplamento forçado;
- Resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes;
- Qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras;
- Resistência à corrosão e à fadiga;
- Eficiência de vedação;
- Aspectos estéticos e de aparência.

Diversas organizações, como ABNT, ISO, DIN e JIS dispõem de normas técnicas para análise da rugosidade de superfícies. Na Tabela 7 é mostrado alguns dos parâmetros utilizados para a caracterização da rugosidade.

Tabela 7 - Principais parâmetros de rugosidade

Símbolo	Nome	Definição
Ra	Desvio aritmético médio do perfil em avaliação	Média dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem
Rq	Desvio médio quadrático do perfil em avaliação	Raiz quadrada média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem
Rt	Altura total do perfil	Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação
Rz	Altura máxima do perfil	Soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem

Fonte: Diei et. Al., 2015; Norma NBR ISO 4287, 2002

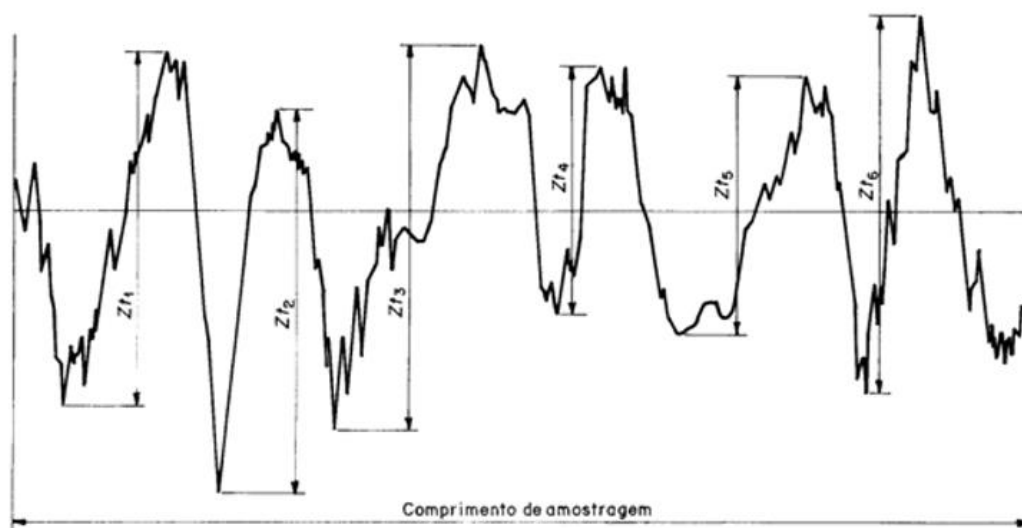
Na presente pesquisa, os critérios para análise e caracterização das propriedades superficiais adotados compreendem os parâmetros de rugosidade R_a , R_t e R_z .

- **Desvio aritmético médio do perfil em avaliação (R_a)**

O parâmetro da média aritmética R_a é um dos mais amplamente reconhecido e utilizado na indústria, principalmente nos processos convencionais de usinagem onde representa o desgaste da ferramenta e é acessível através de instrumentos de medição simples. Esse parâmetro é definido como a média aritmética dos valores absolutos em relação a linha média representado pelos picos e vales do perfil ao longo do comprimento de amostragem, conforme é ilustrado na Figura 11.

De acordo com Sedlacek; Podgornik; Vizintin (2009), por si só, o R_a não é totalmente capaz de identificar certas características significativas de pequenas mudanças no perfil da rugosidade. É importante observar que superfícies geometricamente distintas podem apresentar valores de R_a bastante similares ou idênticos como estudo entre superfícies em contato, porém, terem diferentes desempenhos tribológicos, desta forma outros parâmetros de rugosidade são necessários como, por exemplo, o R_{sk} (Fator de assimetria perfil em avaliação).

Figura 11 - Desvio aritmético médio (R_a)

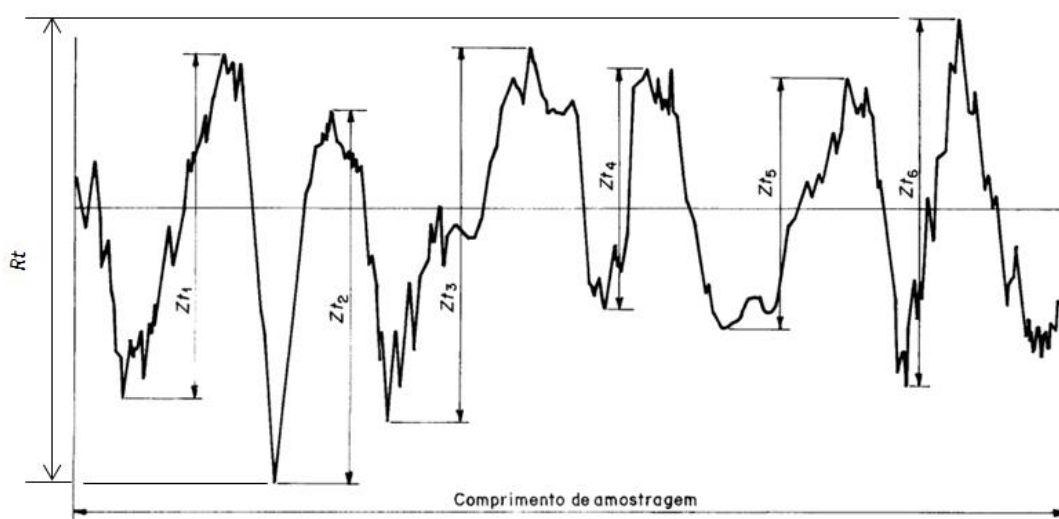


Fonte: Adaptado da NORMA NBR ISO 4287, 2002

- **Altura total do perfil (R_t)**

O parâmetro de rugosidade R_t é compreendido como a soma da maior altura dos picos do perfil Z_p com a maior profundidade dos vales do perfil Z_v ao longo do comprimento de avaliação é representada na Figura 12. Existe uma relação entre o parâmetro R_t e o parâmetro R_z , sendo que R_t é sempre igual ou maior que R_z , expresso como $R_t \geq R_z$. Essa relação entre os parâmetros ressalta a conexão entre a altura dos picos e a profundidade dos vales ao avaliar a rugosidade superficial.

Figura 12 - Altura total do perfil (R_t)



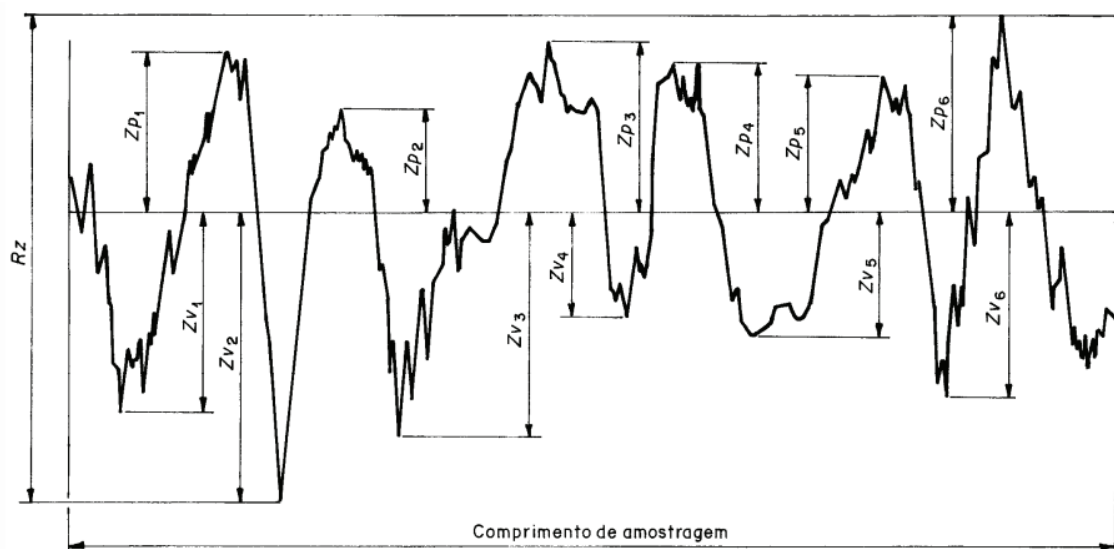
Fonte: Adaptado da Norma NBR ISO 4287, 2007.

- **Altura máxima do perfil (R_z)**

Segundo a norma NBR ISO 4287 (2002), a definição da rugosidade R_z é delineada como a soma da altura máxima dos picos do perfil Z_p e a maior das profundidades dos vales do perfil Z_v , ao longo do comprimento de amostragem conforme é ilustrado na Figura 13. Em contraste, na versão anterior da norma NBR ISO 4287-1 (1984), a rugosidade R_z era empregada para indicar a altura das irregularidades sobre dez pontos. É pertinente observar que ainda existem instrumentos em uso para medir a rugosidade de superfícies utilizando o parâmetro R_z anterior. Portanto, ao empregar documentos técnicos e desenhos existentes, é importante exercer cautela, pois os resultados provenientes de diferentes tipos de instrumentos de medição podem apresentar discrepâncias não necessariamente insignificantes. É fundamental considerar essa variação ao interpretar e comparar

dados obtidos por meio de distintos instrumentos de medição de rugosidade, a fim de evitar falhas ou imprecisões na análise de superfícies e suas características.

Figura 13 - Parâmetro Rz



Fonte: Norma NBR ISO 4287, 2002.

3.10.4 Características do cavaco e mecanismo de formação do cavaco

A análise da formação de cavacos durante os procedimentos de usinagem desempenha um papel importante, impactando uma série de variáveis nesse contexto. Essa influência se estende diretamente ao desgaste das ferramentas, nos esforços de corte, à geração de calor, à eficácia na penetração do fluido de corte, e a outros elementos. Esses aspectos estão intimamente ligados aos fatores econômicos e à qualidade final da peça produzida. Assim, compreender e controlar a formação de cavacos é essencial para otimizar os processos de usinagem, garantindo não apenas eficiência econômica, mas também aprimoramento na qualidade das peças fabricadas (MACHADO et. al., 2015).

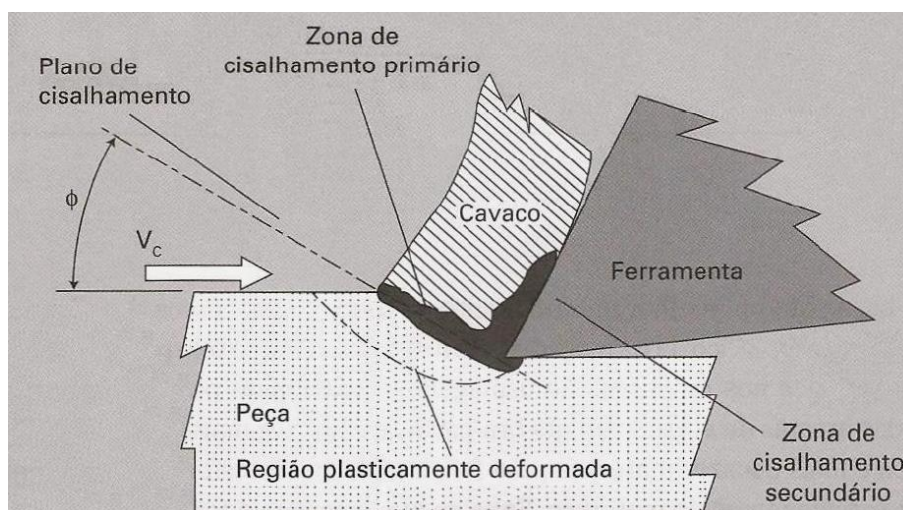
Durante o processo de corte, as propriedades do cavaco são diretamente influenciadas por diversos elementos, como as propriedades do material trabalhado, a composição do material da ferramenta, a geometria específica da ferramenta, a condição das arestas de corte, a posição de corte adotada, bem como os parâmetros e condições estabelecidas para o corte.

Sob um conjunto de condições estáveis, a formação de cavacos permanece inalterada, a menos que um dos fatores mencionados anteriormente seja modificado. Observar a formação de cavacos pode, portanto, servir como um indicador útil ao tentar replicar condições experimentais utilizadas anteriormente, como um sinal de mudança nas condições durante um teste de vida útil da ferramenta. Essas observações podem indicar a variação da estabilidade das condições de corte, como um indicador de alterações na usinabilidade da peça ou até mesmo um indicador de falhas inesperadas na aresta de corte do inserto de usinagem.

Segundo Machado et al. (2015), o processo de formação de cavacos implica nos seguintes fenômenos:

- Recalque inicial: se refere à pressão exercida pela cunha de corte ao penetrar no material da peça, o que leva à compressão de uma pequena porção desse material. Essa porção permanece aderida à peça e é pressionada contra a superfície de saída da ferramenta.
- A deformação e ruptura: começa com a deformação elástica do material recalcado, seguida pela deformação plástica, onde esta última cresce gradualmente até alcançar a tensão de cisalhamento necessária para iniciar o deslizamento. O material recalcado começa a deslizar ao longo dos planos de cisalhamento, de forma que os planos instantâneos de ruptura e propagação de trincas estabelecem uma região específica entre a peça e o cavaco, conhecida como zona primária de cisalhamento, cujo esquema está representado na Figura 14.

Figura 14 - Mecanismo de formação de cavacos



Fonte: Machado et al., 2015.

- Deslizamento das lamelas: o avanço contínuo da ferramenta na peça induz à ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento, de acordo com as condições de usinagem e pelas propriedades do material em questão. Essas características determinarão a extensão com que o segmento de material rompido permanecerá unido ao cavaco recém-formado.
- A saída do cavaco: ocorre à medida que a interação contínua entre a peça e a ferramenta propicia o deslocamento da porção de material deformado e cisalhado (o cavaco) ao longo da superfície de saída da ferramenta. Esse movimento cria uma área conhecida como zona de cisalhamento secundário. Esse processo se repete de maneira sucessiva com o material adjacente, caracterizando o processo de formação do cavaco como periódico.

3.10.4.1 Tipos de cavaco

Dependendo da ductilidade e fragilidade do material, condutividade térmica do material da peça de trabalho, natureza da ferramenta de corte e dos parâmetros de usinagem o cavaco formado pode ser classificado em diferentes tipos e formas. Os tipos em questão são mencionados conforme descrito por Machado et. al. (2015):

- Contínuos: são originados durante procedimentos de usinagem que lidam com materiais dúcteis com uma alta velocidade de corte, em pequenos e médios avanços e grandes ângulos de saída da ferramenta. Nesses casos, o material sofre cisalhamento na zona primária com elevada deformação plástica contínua, conservando sua estrutura homogênea, sem passar por fragmentação, ou seja, os cavacos mantêm espessura uniforme ao longo do seu comprimento e normalmente resulta em um bom acabamento superficial;
- Descontínuos: são produzidos durante os procedimentos de usinagem com materiais frágeis, os quais não possuem a capacidade de resistir a grandes deformações sem se romper. Nesses casos, parâmetros de usinagem com baixas velocidades de corte, ângulos de saída reduzidos do inserto de corte e elevados avanços, contribuem para a formação desse tipo de cavaco em materiais com baixa ductilidade.

- Segmentados: são identificados por apresentarem consideráveis deformações em estreitas áreas entre segmentos, onde há pouca ou quase nenhuma deformação no interior desses segmentos. Durante o processo de cisalhamento, o calor gerado induz uma taxa de amolecimento local maior do que a taxa de encruamento. Isso resulta na continuidade da deformação dentro do mesmo plano primário de cisalhamento, até que se afaste o suficiente da aresta de corte do inserto de usinagem, momento em que as tensões de cisalhamento não podem mais manter a deformação. Nesse instante, uma nova área de cisalhamento inicia-se, originando um processo cíclico de produção de cavacos que se assemelham a dentes de serra.

3.10.4.2 Formas de cavaco

Os cavacos podem ser diferenciados quanto à sua forma. Algumas formas de cavaco prejudicam a operação de usinagem e o acabamento superficial da peça, além de desgastar as ferramentas.

A norma NBR ISO 3685 (2017) fornece uma classificação detalhada da forma dos cavacos mais comumente observados e que devem ser utilizados como um exemplo, devido ao fato de que um número quase ilimitado de diferentes tipos de cavaco pode ser produzido, é recomendável que um sistema de classificação seja estabelecido para cada processo de usinagem real.

O sistema básico de codificação compõe dois dígitos que se relacionam com as características básicas do cavaco, como exemplo 2.2 é o código para designar um “cavaco tubular curto” conforme é mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Formas de cavacos produzidos na usinagem dos metais

1- Cavaco em fita	2- Cavaco tubular	3- Cavaco espiral	4- Cavaco hel. tipo arruela	5- Cavaco hel. cônico	6- Cavaco em arco	7- Cavaco fragmentado	8- Cavaco tipo agulha
							
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conect.		
							
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
							
1-3- Emaranhado	2-3- Emaranhado		4-3- Emaranhado	5-3- Emaranhado			

Fonte: Adaptado da norma NBR ISO 3685, 2017.

Os cavacos em forma de fita são tipicamente os mais problemáticos em processos de usinagem. Eles têm a tendência de se alojar por toda a máquina-ferramenta, enrolam-se nas ferramentas, na peça de trabalho e nos dispositivos de fixação, podendo resultar na quebra das ferramentas, obstruir os mecanismos de manipulação de cavaco, são difíceis de remover e representam riscos, especialmente quando começam a se agitar de forma descontrolada. Esse tipo de cavaco é comumente observado em aços com baixo teor de carbono. Uma estratégia para mitigar o problema dos cavacos em forma de fita é aumentar o avanço da ferramenta, pois um cavaco mais espesso tende a se fragmentar mais facilmente (SOUZA et al., 2016).

Segundo Souza et al. (2016), os cavacos emaranhados são cavacos contínuos que se assemelham bastante aos cavacos em forma de fita. Geralmente, são gerados por condições semelhantes às que produzem os cavacos em forma de fita, resultando os mesmos tipos de problemas. Portanto, é razoável que para resolver um problema relacionado a cavacos emaranhados, os mesmos métodos utilizados para lidar com cavacos em forma de fita seriam aplicados. Além disso, o resfriamento com o uso de óleo refrigerante, frequentemente auxilia na quebra desses cavacos. Entre as formas de cavacos que acarretam menos contratempos no processo de usinagem de metais, os tipos espirais plano e cônico, arco desconectado e fragmentado são altamente

desejados, sobretudo para otimizar o processo de usinagem, trazendo uma redução significativa nos problemas ao longo desse processo.

3.11 Métodos estatísticos

3.11.1 Planejamento de experimentos

A execução de experimentos representa uma prática essencial na pesquisa científica, visando adquirir conhecimento sobre o objeto de estudo.

Conforme Montgomery e Runger (2016), apud Bustamante (2017), técnicas de planejamento de experimentos com fundamentos estatísticos, são extremamente valiosas no contexto da engenharia. A implementação de experimentos planejados possibilita identificar qual variável exerce a maior influência no desempenho do processo. Algumas aplicações usuais de experimentos planejados estatisticamente em projetos de engenharia incluem:

- Análise e comparação de configurações fundamentais de projeto;
- Avaliação de materiais distintos;
- Escolha de parâmetros de projeto para garantir o desempenho eficiente do em diversas condições de trabalho.
- Identificação dos principais parâmetros de projeto que influenciam o desempenho do produto.

A aplicação de técnicas de planejamento de experimentos no projeto pode culminar em produtos mais simples de fabricar, com desempenho superior em condições práticas e maior confiabilidade. Adicionalmente, há a possibilidade de encurtar os prazos de projeto, desenvolvimento e produção dos produtos.

3.11.2 Análise estatística dos resultados do planejamento experimental

Após a realização dos experimentos unitários, nos quais todas as variáveis de resposta predefinidas são mensuradas, é imperativo que o pesquisador processe os dados obtidos para a formulação dos resultados estatísticos. Tipicamente, esses resultados englobam, no mínimo, a análise de variância e o modelo de regressão (KOUSHA et al., 2012; SOLTANI et al., 2014; YONGFAN et al., 2017; KUSUMA et al., 2019).

A avaliação dos efeitos individuais e interativos dos fatores é realizada por meio da análise de variância, conhecida como Analysis Of Variance (ANOVA). O resultado principal é observado através da comparação do "p-valor calculado" com o "p-valor de referência", geralmente estabelecido em 0,05 para um nível de confiança de 95 %. O efeito sobre a variável resposta é considerado significativo quando o $p\text{-valor}_{\text{calculado}}$ é menor que o $p\text{-valor}_{\text{referência}}$, ou seja, inferior a 0,05. Essa "tomada de decisão" é fundamentada no teste de hipótese estatística (SAHOO e GUPTA, 2012; YONGFAN et al., 2017; PINHEIRO et al., 2018).

Conforme Breitz et al. (2014) e Annigeri et al. (2016), o modelo de regressão possibilita a compreensão do comportamento da variável resposta em relação ao efeito interativo dos fatores em todo o domínio experimental, não se limitando aos pontos específicos onde os experimentos foram conduzidos.

De acordo com Kousha et al. (2012), Abedfar e Sadeghi (2019) e Kumar, S. et al. (2020), a avaliação do modelo de regressão ocorre por meio da ANOVA para verificar a significância dos coeficientes, a adequação ao experimento (representada pelo coeficiente de determinação ajustado, R^2_{ajustado}) e a presença ou ausência de falta de ajuste. O grau de significância ($p\text{-valor}_{\text{calculado}}$) para cada coeficiente linear ou quadrático é estabelecido por meio do teste de hipótese "T-Student", tipicamente a um nível de confiança de 95 % ($p\text{-valor}_{\text{referência}} = 0,05$).

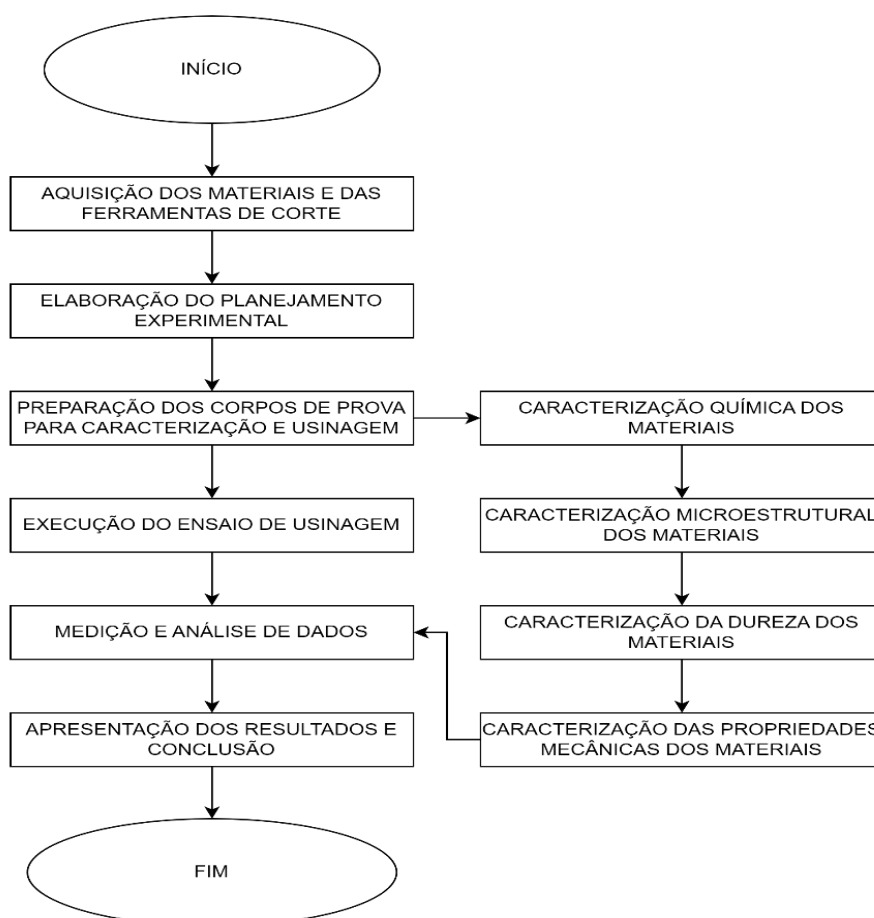
4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas as características dos materiais utilizados nos ensaios, abrangendo a composição química, microestrutura, dureza, propriedades mecânicas, dimensões do corpo de prova, desgaste e vida útil da ferramenta, rugosidade e formação do cavaco. Além disso, são detalhados os equipamentos, ferramentas e métodos empregados no presente estudo.

4.1 Fluxograma

Na Figura 16 é mostrado o fluxograma que condensa a sequência dos procedimentos empregados nesta pesquisa.

Figura 16 - Fluxograma da sequência dos procedimentos



Fonte: Próprio autor, 2022.

4.2 Materiais

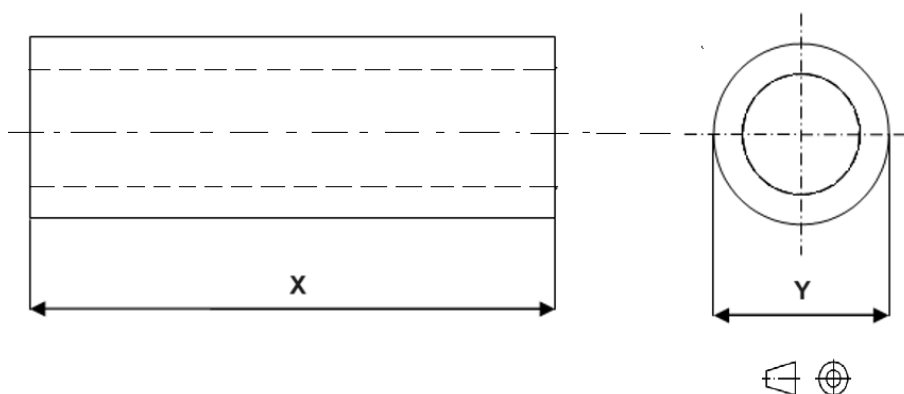
Os corpos de prova utilizados em todos os ensaios foram obtidos por meio de amostras de tubos sem costura, trefilados a frio, no aço DIN C45. As dimensões das amostras da matéria prima foram de 82,5 mm x 18 mm (diâmetro externo x espessura) no estado normalizado de fornecimento (+N) e 52 mm x 7 mm (diâmetro externo x espessura) no estado de alívio de tensão (+SR), ambos com comprimento inicial de 150 mm.

4.3 Procedimento experimental de usinabilidade

O desenvolvimento experimental foi conduzido por meio de ensaios de torneamento à seco na superfície do diâmetro interno dos corpos de prova. Esta avaliação foi realizada por meio da análise do desgaste de flanco do inserto de usinagem, da rugosidade da superfície usinada e da morfologia do cavaco de usinagem.

Os corpos de prova destinados ao ensaio de usinabilidade foram preparados obedecendo a relação comprimento/diâmetro (X/Y), a qual deve ser inferior a 10, conforme estabelecido pela norma NBR ISO 3685 (2017), como é ilustrado na Figura 17 e na Tabela 8. A observância desse requisito é de extrema importância para assegurar a estabilidade do processo, eliminando ou minimizando a ocorrência de vibrações durante o ensaio de usinabilidade.

Figura 17 - Modelo de corpo de prova utilizado pra o ensaio de usinabilidade



Fonte: Próprio autor, 2022.

Tabela 8 - Dimensões dos corpos de prova e relação entre comprimento (mm) e diâmetro (mm)

Material	Estado de fornecimento	Comprimento (X)	Diâmetro (Y)	Relação X/Y
C45	Normalizado (+N)	73	82,5	0,88
C45	Alívio de Tensão (+SR)	73	52	1,40

Fonte: Próprio autor, 2022

Os ensaios de torneamento a seco foram conduzidos utilizando um único tipo de ferramenta de corte em metal duro, com os passes de usinagem sendo repetidos no mínimo cinco vezes até atingir o volume total de remoção de material planejado para cada conjunto de parâmetros das variáveis de entrada de usinagem. O resultado final da rugosidade foi calculado por meio da média simples das medições entre as repetições dos passes de usinagem em cada ensaio.

Os parâmetros de usinagem foram estabelecidos com base em informações de uso em processos industriais, considerando também os limites recomendados pelo fabricante das ferramentas de corte Mitsubishi Materials. Os valores recomendados pelo fabricante incluem uma faixa de velocidade de corte de 150 m/min a 300 m/min, avanço entre 0,08 mm/rot e 0,30 mm/rot, e profundidade de corte dentro da faixa de 0,5 mm a 2 mm.

O volume total de material removido no torneamento foi de $188,50 \times 10^3 \text{ mm}^3$ para cada experimento do corpo de prova com tratamento térmico de normalização (+N) e $168,75 \times 10^3 \text{ mm}^3$ para cada experimento do corpo de prova com tratamento térmico de alívio de tensão (+SR), essas condições foram definidas em função das espessuras dos materiais considerando a manutenção da estabilidade do processo de torneamento, bem como a quantidade de material disponível para os experimentos.

Os experimentos foram concebidos considerando as variáveis independentes (ou parâmetros de entrada), também chamadas de fatores, avanço (f_n) e velocidade de corte (V_c). Foi utilizado um planejamento fatorial completo 3^2 configurando três níveis e dois fatores o que resulta em 9 ensaios, sem réplicas. Os fatores foram manipulados com seguintes valores dos níveis: 0,15 mm/rot (-1), 0,23 mm/rot (0) e 0,30 mm/rot (+1) para o avanço, ao passo que os valores para a velocidade de corte foram 180 m/min (-1), 278 m/min (0) e 300 m/min (+1).

O comprimento de usinagem foi mantido constante no valor de 55 mm, e a profundidade de corte (A_p) permaneceu constante em 0,80 mm no raio para cada passe de usinagem.

Nas Tabelas 9 e 10, observa-se o delineamento dos experimentos de torneamento a seco.

Tabela 9 - Parâmetros de entrada de usinagem e planejamento dos experimentos para o material C45 com tratamento térmico de Alívio de Tensão

Variáveis de entrada (fator)	Variação dos parâmetros (níveis)		
	Mínimo (-1)	Central (0)	Máximo (+1)
Avanço - f_n (mm/rot)	0,15	0,23	0,30
Velocidade de corte - V_c (m/min)	180	278	300
Profundidade de corte - A_p (mm) - Raio	0,80	0,80	0,80

Planejamento dos experimentos			
Ensaio	Execução	f_n	V_c
1	3	-1	-1
2	2	-1	0
3	7	-1	+1
4	6	0	-1
5	1	0	0
6	8	0	+1
7	5	+1	-1
8	4	+1	0
9	9	+1	+1

Fonte: Próprio autor, 2022.

Tabela 10 - Parâmetros de entrada de usinagem e matriz de experimentos para o material C45 com tratamento térmico de Normalização

Variáveis de entrada (fator)	Variação dos parâmetros (níveis)		
	Mínimo (-1)	Central (0)	Máximo (+1)
Avanço - f_n (mm/rot)	0,15	0,23	0,30
Velocidade de corte - V_c (m/min)	180	278	300
Profundidade de corte - A_p (mm) - Raio	0,80	0,80	0,80

Planejamento dos experimentos			
Ensaio	Execução	f_n	V_c
1	1	-1	-1
2	4	-1	0
3	7	-1	+1
4	2	0	-1
5	5	0	0
6	8	0	+1
7	3	+1	-1
8	6	+1	0
9	9	+1	+1

Fonte: Próprio autor, 2022.

4.4 Caracterizações

4.4.1 Análise química

A análise química do aço C45 foi realizada por meio de espectrometria de emissão óptica, equipamento da marca TermoFischer, modelo ARL4460 juntamente com o software analítico de emissão óptica OXSAS, afim de comparar com a composição química especificada na norma EN10083-2 (2006).

4.4.2 Análise metalográfica

O corte das amostras foi efetuado sob resfriamento constante, sendo que a área da face foi de 1 cm² (1 cm de largura x 1 cm de comprimento). Para realizar esse

procedimento, utilizou-se a máquina cortadora metalográfica marca Arotec, modelo COR 80/2. As amostras foram embutidas com resina fenólica de cura a quente (baquelite) a aproximadamente 100 °C, com auxílio da embutidora metalográfica PRE 30Mi Arotec. Após o embutimento, a preparação superficial das amostras passou por etapas consecutivas de lixamento, utilizando lixas d'água com granulometrias de 120 mesh, 240 mesh, 320 mesh, 400 mesh e 600 mesh. Posteriormente, o processo de polimento foi realizado na sequência apresentada, utilizando pasta de diamante com granulometrias de 9 µm, 3 µm e 1 µm. Para revelar a microestrutura, as amostras foram quimicamente atacadas com uma solução do reagente Nital a 5 %.

Após a conclusão do processo de preparo das amostras, procedeu-se à análise de suas microestruturas utilizando o microscópio óptico Kontrol modelo LM-713. Foram capturadas imagens digitalizadas das amostras, com diversas ampliações.

4.4.3 Ensaio de dureza

A preparação dos corpos de prova para a realizar o ensaio de dureza foi conduzida de acordo com os mesmos procedimentos que foram aplicados para a preparação dos corpos de prova do ensaio de análise metalográfica.

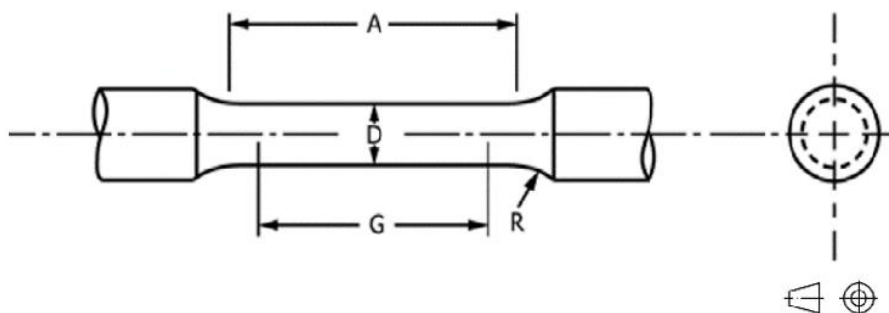
A avaliação da dureza das amostras foi realizada por meio do ensaio de microdureza Vickers, utilizando um microdurômetro Shimadzu, modelo HMV-2T.

Para a análise de dureza, foram escolhidos aleatoriamente 10 pontos em cada uma das amostras. Em cada ponto selecionado, o indentador penetrou na amostra por 15 segundos, aplicando uma carga de 1,961 N. Ao término do ensaio, foram registradas 10 medições de dureza Vickers para cada amostra. Por fim, as médias e desvios padrão foram calculados a partir dos dados coletados.

4.4.4 Ensaio de tração

A condução do ensaio ocorreu por meio de uma máquina universal de ensaios da marca Instron, modelo 5992, utilizando o sistema de aquisição de dados Blue Hill3 e um extensômetro mecânico. Os corpos de prova foram preparados de acordo com os requisitos definidos pela norma ASTM A370 (2023), cuja representação esquemática é apresentada na Figura 18, e as dimensões correspondentes são detalhadas na Tabela 11.

Figura 18 - Desenho legenda das cotas do corpo de prova de tração uniaxial



Fonte: Adaptado da norma ASTM A370, 2023.

Tabela 11 - Dimensões dos corpos de prova de tração uniaxial previstas pela norma ASTM A370

Cota	Matéria prima 82,5 mm x 18 mm aço C45 +N	Matéria prima 52 mm x 7 mm aço C45 +SR
	Dimensões (mm)	Dimensões (mm)
A	mín. 60	mín. 20
D	12,50 $\pm$ 0,25	4,00 $\pm$ 0,08
G	50,00 $\pm$ 0,10	16,00 $\pm$ 0,10
R	mín. 10	mín. 4

Fonte: Adaptado da norma ASTM A370, 2023.

4.5 Máquina operatriz de usinagem utilizada nos ensaios

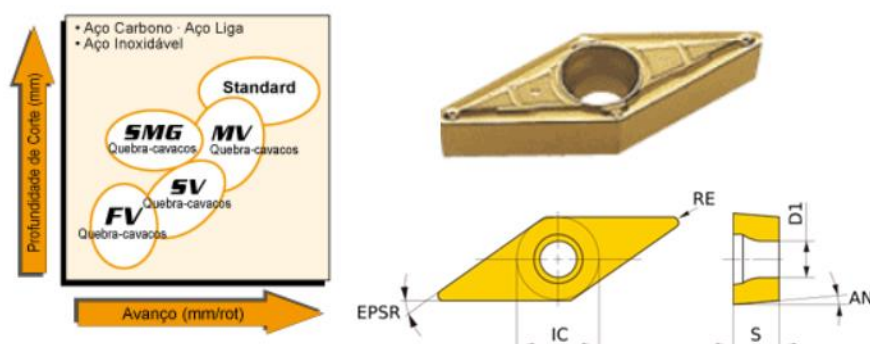
O ensaio de usinabilidade foi realizado no Torno Centur 30D da marca Romi, com uma potência de 9 kW e rotação máxima de 4000 rpm. O torno é equipado por um software de CNC (Comando Numérico Computadorizado) modelo 810 da Siemens.

4.6 Ferramentas de corte

Nos ensaios, foi empregado o inserto de usinagem (pastilha de usinagem) em metal duro, revestido com nitreto de titânio (TiN) por meio da deposição química em fase a vapor (CVD). O inserto foi fabricado pela empresa Mitsubishi Materials, com a designação VBMT 110304 – MV UE6020, na classe ISO P20, que é recomendada para aços em geral. O inserto possui a faixa de atuação de velocidade de corte entre

150 m/min a 300 m/min e o avanço entre 0,08 mm/rot a 0,30 mm/rot. O modelo MV possui duplo quebra-cavacos e pontos arredondados na face do ângulo de ataque que alcançam uma ampla gama de escoamento de cavaco. Na Figura 19 e na Tabela 12 observa-se respectivamente outras características e especificações detalhadas do inserto de usinagem.

Figura 19 - Representação do inserto de usinagem



Fonte: Mitsubishi Materials, 2023 (Adaptado).

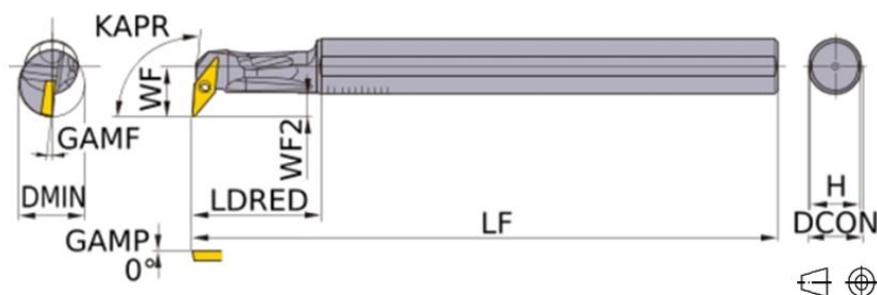
Tabela 12 - Especificações do inserto de usinagem

Inserto de corte VBMT 110304 - MV UE6020	
Nome da classe	Metal duro
Classe	UE6020
Revestimento	CVD - TiN
Sentido de corte	N
Diâmetro do furo de fixação - D1	2,9 mm
Diâmetro do círculo inscrito - IC	6,35 mm
Ângulo da ponta - EPSR	35°
Ângulo de folga principal - AN	5°
Espessura do inserto de corte - S	3,18 mm
Raio da ponta - RE	0,4 mm
Geometria do quebra cavaco	MV

Fonte: Mitsubishi Materials, 2023 (Adaptado).

O inserto de usinagem foi instalado no suporte porta-ferramenta, código FSVUB20 16R-11S, fabricado pela Mitsubishi Materials, o qual apresenta características e especificações que são detalhadas na Figura 20 e Tabela 13, respectivamente.

Figura 20 - Representação do suporte do insertos de usinagem



Fonte: Mitsubishi Materials, 2023 (Adaptado).

Tabela 13 - Especificações do suporte do inserto de usinagem

Suporte do Inserto de corte FSVUB20 - 11S	
Diâmetro mínimo do furo - DMIN	20 mm
Diâmetro da conexão - DCON	16 mm
Ângulo da aresta de corte da ferramenta - KAPR	93°
Comprimento funcional - LF	180 mm
Balanço mínimo - LDRED	32,5 mm
Largura funcional - WF	15,5 mm
Altura da haste - H	15 mm
Altura menor da haste - WF2	8 mm
Ângulo de inclinação - GAMF	8°
Ângulo de saída ortogonal - GAMP	0°

Fonte: Mitsubishi Materials, 2023 (Adaptado).

4.7 Análise do desgaste e vida da ferramenta

Embora não seja possível antecipar previamente qual tipo de desgaste predominará na ferramenta de corte, é essencial, para a realização dos ensaios, estabelecer o tipo e o valor do critério de fim de vida. Nesse contexto, foi adotado o critério de largura média da marca do desgaste do flanco VB_B máx. = 0,30 mm para ferramentas de metal duro, conforme estipulado pela norma NBR ISO 3685 (2017).

Os insertos de usinagem foram examinados por meio de lupa digital ao término de cada operação dos passes de usinagem. Os insertos que apresentaram desgaste de flanco igual ou superior ao VB_B máximo estipulado, ou falha catastrófica, foram utilizados na outra aresta de corte, oposta à desgastada, ou substituídos. É ilustrado na Figura 21 o desgaste de flanco em uma aresta de corte do inserto de usinagem utilizado nos experimentos.

Figura 21 – Ilustração da ferramenta de corte VBMT110304-MV UE6020 e suas arestas de corte



Fonte: Próprio autor, 2023.

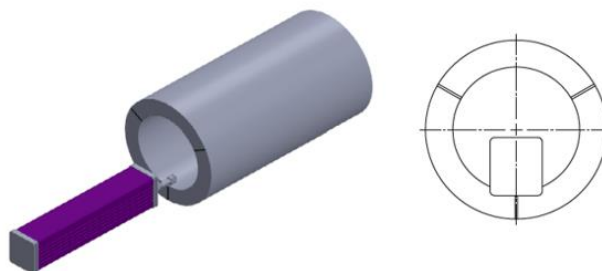
4.8 Mensuração da rugosidade superficial bidimensional (2D)

O acabamento superficial dos corpos de prova foi avaliado pelos parâmetros de rugosidade: R_a , R_t e R_z . A medição foi conduzida por meio do método de contato, utilizando um rugosímetro portátil da marca Tesa, modelo Rugo Surf 20 em três pontos equidistantes no sentido horizontal da superfície interna dos corpos de prova conforme é demonstrado na Figura 22. O rugosímetro foi configurado com cinco cut-off's de 0,80 mm de comprimento de amostragem, totalizando 4 mm como comprimento total de medição (avaliação).

Os resultados obtidos foram transcritos para planilhas, nas quais foram manipulados e realizados os cálculos das médias de três medições equidistantes em cada um dos passes de usinagem e dos respectivos desvios padrão dos ensaios.

Posteriormente, os parâmetros bidimensionais, média aritmética (Ra), altura total (Rt) e altura máxima (Rz), foram submetidos a análises estatísticas como variáveis de resposta nos experimentos.

Figura 22 - Localização da medição da rugosidade



Fonte: Próprio autor, 2023.

4.9 Análise da formação dos cavacos

A análise dos cavacos formados nos ensaios foi realizada por meio de lupa digital, e suas características foram comparadas com a classificação dos cavacos conforme a norma NBR ISO 3685 (2017).

4.10 Análise do volume de material removido

O cálculo do volume de material removido foi realizado utilizando a Equação 1, correlacionando o volume removido pelo desgaste de flanco do inserto de corte e o volume removido pela rugosidade. Esse cálculo permite a comparação do rendimento do inserto de corte de diferentes fabricantes, considerando o mesmo tipo de aço, estado de fornecimento e parâmetros de usinagem.

$$Q = \pi (Rf - Ri) * lc \quad (1)$$

Onde:

Q = Volume de material removido (mm³);

Lc = Comprimento de corte (mm);

Rf = Raio final após a usinagem (mm);

Ri = Raio inicial, antes da usinagem (mm);

π = Constante 3,1416.

4.11 Análise estatística dos resultados

A análise dos parâmetros de rugosidade teve início com base nos resultados de média aritmética, desvio padrão e coeficiente de variação. Posteriormente, os efeitos dos fatores foram representados nos gráficos de Pareto. Os níveis de significância e as contribuições percentuais de cada variável independente foram detalhados na tabela ANOVA. As equações preditivas foram formuladas por meio da análise de regressão para os parâmetros de rugosidade levando em consideração os níveis dos fatores. A análise dos resultados foi finalizada ao observar o comportamento dos parâmetros de rugosidade em relação ao avanço, à velocidade de corte e ao desgaste da ferramenta.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e as discussões apresentados nesta seção foram organizados em dois temas principais. O primeiro aborda a caracterização dos materiais, visando compreender suas características e propriedades, incluindo a composição química, estrutura metalográfica, dureza e propriedades mecânicas. O segundo tópico descreve os resultados obtidos na usinabilidade dos materiais, abrangendo a rugosidade da superfície usinada, os mecanismos de desgaste, formação dos cavacos e as análises estatísticas associadas.

5.1 Análise química

Na Tabela 14 é exibido a composição química do aço C45 conforme especificado na norma EN10083-2 (2006), juntamente com os desvios permitidos para cada elemento, conforme é especificado na referida norma. Além disso, é apresentado os resultados da análise química dos produtos. Nota-se que os resultados obtidos estão em conformidade com a composição química estipulada na norma EN10083-2 (2006).

Tabela 14 - Composição química (% em massa) do aço C45

CORPO DE PROVA - AÇO C45 - ALÍVIO DE TENSÃO (+SR)																		
Elementos	C		Si		Mn		P		S		Cr		Mo		Ni		Cr + Mo + Ni	
	min.	máx.	min.	máx.	min.	máx.	min.	máx.	min.	máx.	min.	máx.	min.	máx.	min.	máx.	min.	máx.
Norma EN10083-2	0,42	0,50	-	0,40	0,50	0,80	-	0,045	-	0,045	-	0,40	-	0,10	-	0,40	-	0,63
Resultado da análise	0,471		0,21		0,80		0,011		0,0082		0,17		0,018		0,03		0,22	
Desvios da norma	±0,02		+0,03		±0,04		+0,005		+0,005		+0,05		+0,03		+0,05		-	
CORPO DE PROVA - AÇO C45 - NORMALIZADO (+N)																		
Elementos	C		Si		Mn		P		S		Cr		Mo		Ni		Cr + Mo + Ni	
	min.	máx.	min.	máx.	min.	máx.	min.	máx.	min.	máx.	min.	máx.	min.	máx.	min.	máx.	min.	máx.
Norma EN10083-2	0,42	0,50	-	0,40	0,50	0,80	-	0,045	-	0,045	-	0,40	-	0,10	-	0,40	-	0,63
Resultado da análise	0,461		0,22		0,68		0,009		0,0124		0,07		0,028		0,03		0,13	
Desvios da norma	±0,02		+0,03		±0,04		+0,005		+0,005		+0,05		+0,03		+0,05		-	

Fonte: Norma EN10083-2, 2006 (Adaptado).

Conforme destacado por Silva (2016), o carbono desempenha um papel fundamental na resistência dos aços comuns, uma vez que, durante o processo de tratamento térmico, é o principal agente responsável pelo endurecimento do aço por meio da transformação martensítica. Por outro lado, altos teores de fósforo e enxofre

conferem fragilidade ao aço. Contudo, o enxofre, em especial quando combinado com o manganês, pode melhorar a usinabilidade ao mesmo tempo que compromete a resistência à corrosão, tornando a peça mais suscetível à corrosão localizada.

O manganês desempenha um papel positivo ao aumentar a forjabilidade, temperabilidade e resistência ao impacto do aço. No entanto, é importante notar que o manganês tem propensão a se combinar com o enxofre, formando sulfetos de manganês que podem contribuir para melhor usinabilidade do material (SILVA, 2016).

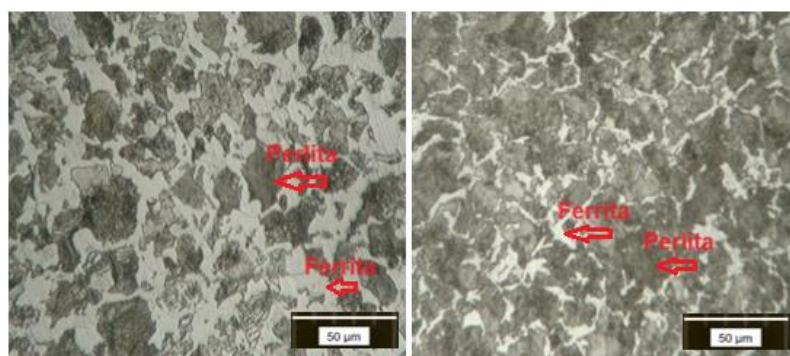
5.2 Análise metalográfica

Conforme evidenciado nas imagens de micrografias o material foi caracterizado como um aço hipoeutetóide (carbono entre 0,02 % e 0,76 % C em peso) de acordo com o diagrama de ferro carbono (BRUNATTO, 2016). Identificou-se a presença de uma microestrutura formada pelos constituintes ferrita (regiões claras) e perlita (regiões escuras) em ambos os tipos de tratamento térmico de normalização e alívio de tensão conforme ilustrado nas Figuras 23 (a) e (b) respectivamente.

A análise metalográfica revela que a microestrutura do aço C45 está em conformidade com os tratamentos térmicos empregados, tendo como base o diagrama ferro carbono (Fe-C) que as ligas hipoeutetóides seguem o mesmo comportamento (BRUNATTO, 2016).

A principal diferença observada ao comparar as micrografias das amostras submetidas a tratamentos térmicos distintos é que a densidade de perlita na amostra tratada termicamente por alívio de tensão aparenta ser mais significativa em comparação à amostra normalizada.

Figura 23 - Microestrutura do aço C 45 com os tratamentos térmicos - Ataque químico: Nital 5 %



(a) Normalização

(b) Alívio de tensão

Fonte: Próprio autor, 2023.

5.3 Dureza

Os valores de dureza estão em concordância com a microestrutura caracterizada dos materiais, em média 297 HV para o tratamento térmico de alívio de tensão e HV 190 HV para normalização. A tabela 15 apresenta a média dos valores de dureza obtidos, acompanhada de seus respectivos desvios padrão.

Tabela 15 - Dureza Vickers das amostras

Tipo de tratamento	HV
Normalização	190 $\pm$ 7
Alívio de tensão	297 $\pm$ 13

Fonte: Próprio autor, 2023.

5.4 Tração

Os resultados obtidos após o ensaio de tração até a fratura dos corpos de prova são apresentados na Tabela 16, os quais consistem na média aritmética simples dos ensaios conduzidos em três corpos de prova para cada tipo de tratamento térmico e são condizentes com os estados de fornecimentos normalizado e alívio de tensão.

Tabela 16 - Propriedades mecânicas do aço C45 relacionadas ao ensaio de tração até a fratura dos corpos de prova

Tipo de tratamento	Rp 0,2 Limite de escoamento (Mpa)	Limite de resistência a tração (Mpa)	Alongamento (%)
Normalização	377 $\pm$ 9	632 $\pm$ 9	26 $\pm$ 2
Alívio de tensão	461 $\pm$ 51	951 $\pm$ 27	20 $\pm$ 1

Fonte: Próprio autor, 2023.

5.5 Análise da usinabilidade por meio de torneamento a seco no diâmetro interno do tubo sem costura do aço DIN C45 trefilado a frio

As análises consideraram a evolução da rugosidade em relação às condições de usinagem, tais como avanço e velocidade de corte, volume de material removido,

desgaste de flanco do inserto de corte, forma do cavaco, além disso, foram empregadas as técnicas estatísticas descritivas e inferenciais.

5.5.1 Análise dos valores das rugosidades em função dos parâmetros de usinagem avanço e velocidade de corte por meio da média e desvio padrão

Nas Figuras 24, 25 e 26 é demonstrado os valores médios dos parâmetros de rugosidade R_a , R_t e R_z obtidos durante o processo de torneamento interno a seco nos materiais C45 Normalizado (+N) e Alívio de tensão (+SR) com seus respectivos desvios padrão, considerando o avanço fixo e variação na velocidade de corte como métricas de avaliação.

Na Figura 24 é representado o contexto do bloco em que o avanço é mantido em 0,15 mm/rot e a velocidade de corte é variada, o experimento 2, com o par de fatores 0,15 – 278, exibiu um comportamento mais instável com maior variabilidade em comparação com os experimentos 0,15 – 180 e 0,15 – 300, para ambos os tipos de tratamento térmico (+N e +SR). No entanto, observou-se que no segundo passe de usinagem do experimento 2, com tratamento térmico +N, ocorreu desgaste no assento da pastilha, ocasionando maiores valores de rugosidade e desvio padrão. Consequentemente, foi necessário substituir o suporte da pastilha por um novo, mantendo a mesma pastilha de corte, uma vez que o desgaste estava abaixo do valor máximo permitido de 0,300 mm (VB máx.).

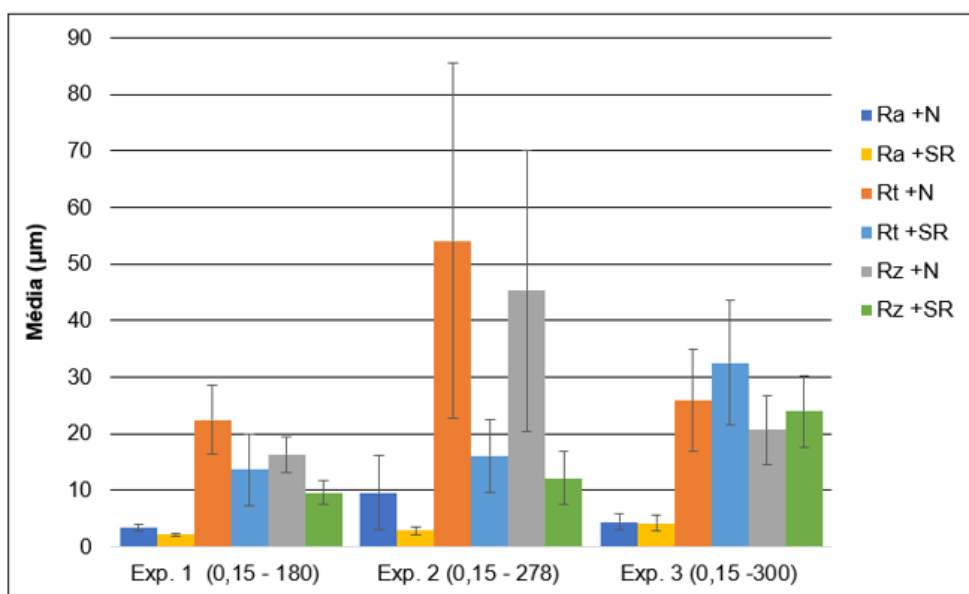
Assim, a análise da rugosidade possibilitou a identificação e resolução do problema no processo. Ao projetar o desempenho sem considerar essa causa conhecida, sugere-se que o experimento 2 teria uma performance próxima ao experimento 1, com o par de fatores 0,15 – 180.

Ainda no contexto da análise do bloco em que o avanço é mantido em 0,15 mm/rot e a velocidade de corte é variada, para o estado de fornecimento com tratamento térmico +SR, observa-se que os experimentos 1 (0,15 – 180) e 2 (0,15 - 278) apresentam resultados com menor variabilidade e comportamento bastante similar. Em contraste, o experimento 3 (0,15 – 300) registrou maior variabilidade, especialmente nos parâmetros R_t e R_z . É relevante destacar que, no experimento 3, ocorreu desgaste de flanco máximo estipulado de 0,300 mm no sexto passe de torneamento dos oitos planejados, um fato que pode corroborar com a pior performance deste experimento analisado.

Observou-se que a mudança do tratamento térmico de normalização (+N) para alívio de tensão (+SR) afeta a rugosidade das superfícies. Em velocidades de corte de 180 m/min e 278 m/min, todas as rugosidades (Ra, Rt e Rz) diminuem ao passar de +N para +SR, com a rugosidade Rt apresentando a maior variação. No entanto, na velocidade de corte de 300 m/min, a rugosidade Ra diminui ligeiramente, enquanto Rt e Rz aumentam. No geral, o aumento da velocidade de corte tende a aumentar a rugosidade média.

Apesar de o maior desvio-padrão indicar maior dispersão dos dados, especialmente nos parâmetros de rugosidade Rt e Rz do experimento 2 no estado de fornecimento +N, graficamente é possível afirmar que os resultados são estatisticamente iguais, considerando a variação dos desvios-padrões entre os estados de fornecimento +N e +SR no mesmo experimento e entre os diferentes experimentos. No entanto, destaca-se que os experimentos com menor desvio-padrão indicam maior confiabilidade, desempenho e consistência.

Figura 24 - Rugosidades Ra, Rt e RZ – f_n fixo 0,15 mm/rot x V_c variando



Fonte: Próprio autor, 2023.

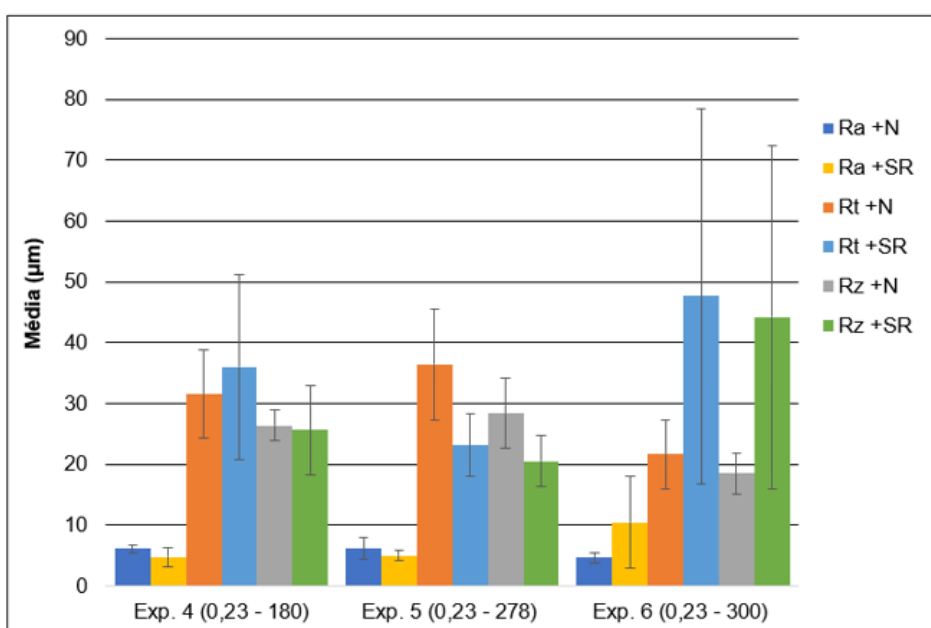
Observa-se na Figura 25 do bloco em que o avanço é mantido constante em 0,23 mm/rot e a velocidade de corte varia no estado de fornecimento +N, em que o experimento 6 (0,23 – 300) exibiu os resultados mais homogêneos com menor variabilidade. Já no estado de fornecimento +SR, o experimento 5, com o par de fatores 0,23 – 278, apresentou os valores menos dispersos. Em contraste, o

experimento 6 (0,23 – 300) exibiu rugosidades com maiores médias e uma maior dispersão nos desvios-padrões. É relevante observar que no experimento 6 ocorreu o desgaste de flanco máximo estipulado de 0,30 mm no segundo passe de torneamento dos oitos planejados, um fato que pode explicar a maior variabilidade deste experimento analisado.

Foi observado que a mudança de +N para +SR provoca uma queda nas médias de rugosidade Ra e Rz nas velocidades de corte de 180 m/min e 278 m/min. Entretanto, a rugosidade Rt aumenta na velocidade de corte de 180 m/min, diminui na velocidade de 278 m/min e aumenta novamente a 300 m/min. A velocidade de corte mais alta, 300 m/min, resulta em um aumento significativo nas médias de rugosidade Ra, Rt e Rz. Em resumo, o tratamento +SR tende a reduzir a rugosidade média nas velocidades de corte mais baixas, mas pode aumentar a rugosidade a 300 m/min, especialmente para o parâmetro Rt.

Embora o maior desvio-padrão indique uma maior dispersão dos dados, graficamente é possível afirmar que os resultados são estatisticamente iguais, considerando a variação dos desvios-padrões nos estados de fornecimento +N e +SR dentro do mesmo experimento e entre os três experimentos. No entanto, destaca-se que os experimentos com menor desvio-padrão indicam maior confiabilidade, desempenho e consistência.

Figura 25 - Rugosidades Ra, Rt e RZ – fn fixo 0,23 mm/rot x Vc variando

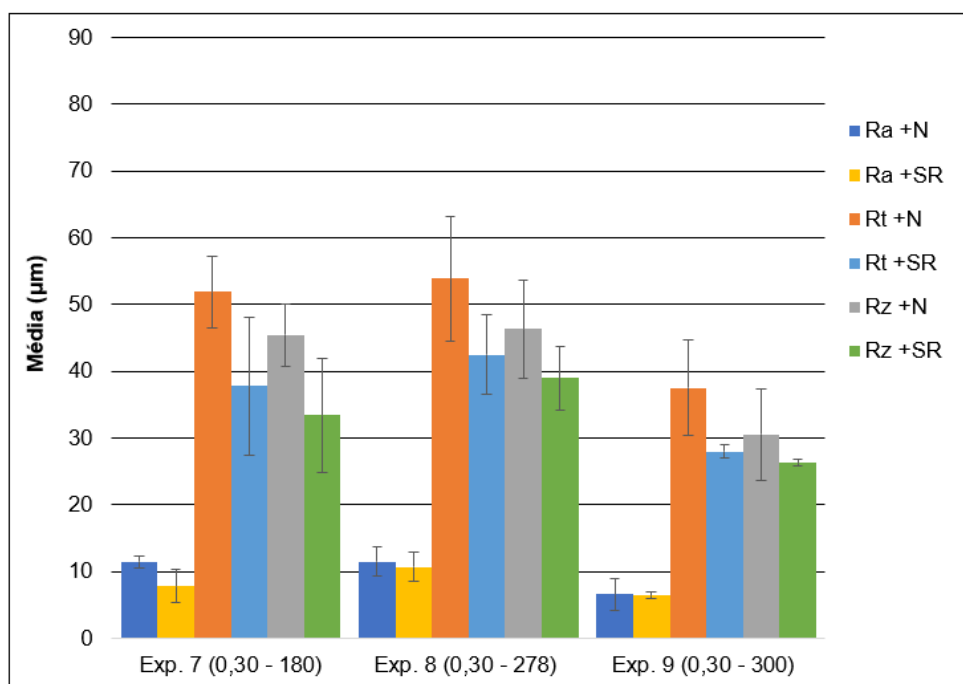


Fonte: Próprio autor, 2023.

Por fim, no bloco em que a velocidade de corte varia e o avanço é mantido constante em 0,30 mm/rot conforme é apresentado na Figura 26, destaca-se que o experimento 9 (0,30 – 300) evidenciou o melhor desempenho entre todos os experimentos, tanto para o estado +N quanto para o estado +SR considerando a média das rugosidades Ra, Rt e Rz. No entanto, é importante ressaltar a ocorrência do desgaste de flanco, atingindo o valor máximo de 0,30 mm no segundo passe de torneamento no experimento 9 com o estado +N, o que resultou na finalização prematura do experimento conforme a regra pré-definida. Da mesma forma, no mesmo experimento, no estado +SR, ocorreu uma falha catastrófica com a quebra do inserto de corte ao longo do primeiro passe de torneamento, levando à interrupção do experimento. Assim, o experimento 9 demonstrou não ser a opção mais adequada entre os três experimentos deste bloco, devido ao desgaste de flanco prematuro no estado +N e à falha catastrófica no estado +SR.

Observou-se que todas as rugosidades apresentaram uma queda na média de rugosidade (μm) comparando o estado de fornecimento +N para +SR. No entanto, essa queda foi mais acentuada nas rugosidades Rt e Rz, enquanto para a rugosidade Ra a diferença foi menor, mas ainda assim significativa.

Embora o desvio-padrão mais elevado indique uma maior dispersão dos dados, principalmente ao observar as rugosidades Rt e Rz no estado +SR no experimento 6, graficamente é possível afirmar que os resultados são estatisticamente similares, considerando a variação dos desvios-padrões nos estados de fornecimento +N e +SR, tanto dentro de um mesmo experimento quanto entre os três experimentos. No entanto, é importante destacar que os experimentos com menor desvio-padrão sugerem maior confiabilidade, desempenho e consistência.

Figura 26 - Rugosidades Ra, Rt e RZ – f_n fixo 0,30 mm/rot x Vc variando

Fonte: Próprio autor, 2023.

A análise revela que, em sua maioria, o material C45 com alívio de tensão (+SR) apresentou menores rugosidades médias em comparação ao material C45 normalizado (+N) em vários experimentos, exceto nos casos dos experimentos 0,15 – 300 e 0,23 – 300, nos quais o C45 +N exibiu menor rugosidade média. Entretanto, ao considerar a variação dos desvios-padrões nos estados de fornecimento +N e +SR, foi observado que os resultados são estatisticamente equivalentes.

É relevante ressaltar que, de modo geral, foram observados desempenhos superiores tanto em velocidades de corte mais baixas quanto em velocidades mais elevadas.

Segundo as observações de Ferraresi (2014), em velocidades de corte mais baixas, ocorre a formação de uma aresta postiça de corte, também conhecida como gume postiço. O material temporariamente depositado na superfície de saída da ferramenta tende a se deslocar na forma de partículas, aderindo tanto ao cavaco quanto à superfície usinada, o que prejudica significativamente o acabamento da superfície. Normalmente, esse problema pode ser mitigado pelo aumento da temperatura de corte, alcançado por meio do incremento na velocidade de corte. De acordo com estudos de Cunha e Ribeiro (2003) e Soares e Rubio (2015), espera-se que uma maior velocidade de corte resulte em menor rugosidade. No entanto, em

alguns experimentos deste estudo, a menor velocidade de corte destacou-se com menores valores médios de rugosidades em relação às velocidades média e mais elevada, contrariando as conclusões dos trabalhos realizados pelos autores citados anteriormente, provavelmente outros fatores não estudados neste presente trabalho podem ter influenciado. Assim, é de suma importância compreender que no processo de torneamento há influência de diversos parâmetros de usinagem, tais como avanço, tensão residual, força de usinagem, temperatura, tipo de ferramenta, entre outros, e não apenas a velocidade de corte isoladamente.

Nas Figuras 27, 28 e 29 está ilustrado os valores médios dos parâmetros de rugosidade R_a , R_t e R_z obtidos no processo de torneamento interno a seco nos materiais C45 Normalizado (+N) e Alívio de Tensão (+SR), juntamente com seus respectivos desvios padrão. Essa análise foi conduzida considerando a variação do avanço, enquanto a velocidade de corte foi mantida constante, como métricas de avaliação.

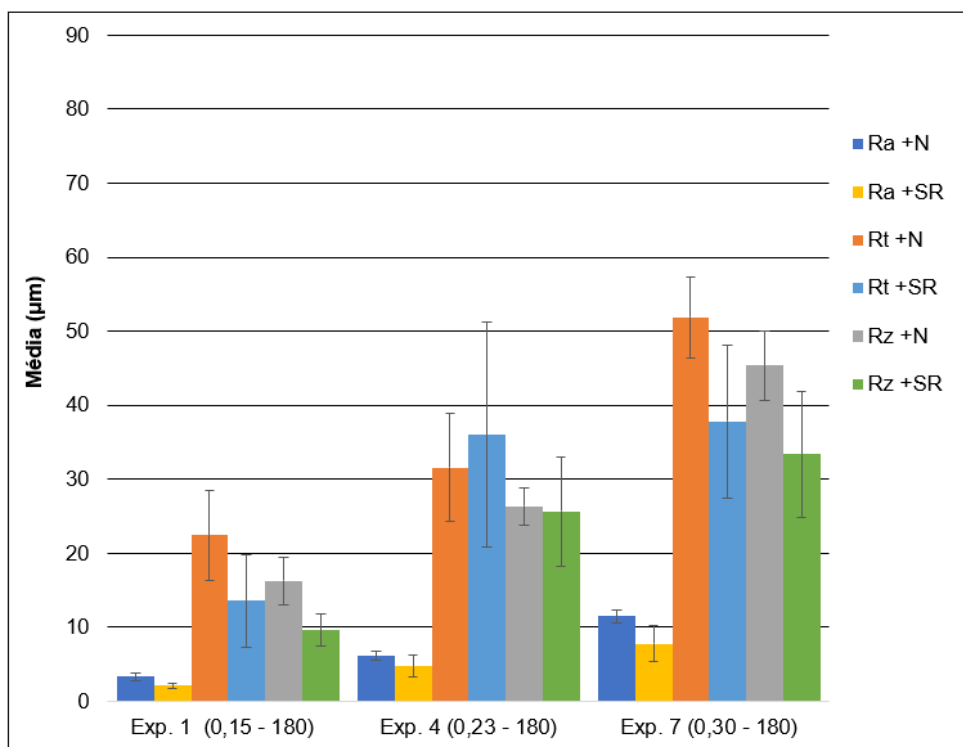
Ao realizar a análise por blocos demonstrados na Figura 27, observa-se que, com a velocidade de corte mantida constante em 180 mm/min, os valores mais baixos de rugosidade média foram registrados no experimento 0,15 – 180, seguido pelo experimento 0,23 – 180. Em contrapartida, o experimento 0,30 – 180 revelou o resultado com maior variabilidade. Essas tendências foram consistentes tanto nos experimentos com o material no estado de fornecimento +N quanto no +SR. No entanto, nos experimentos com o estado de fornecimento com alívio de tensão (+SR), as médias de rugosidade foram globalmente menores em comparação com os experimentos no estado normalizado (+N), com exceção do parâmetro de rugosidade R_t no experimento 4 (0,23 – 180), onde no estado +N apresentou uma média ligeiramente inferior.

Observa-se que o aumento do avanço de 0,15 mm/rot para 0,23 mm/rot resulta em um aumento significativo na média das rugosidades R_a , R_t e R_z . No entanto, a mudança de +N para +SR tende a reduzir a rugosidade média em todos os avanços, exceto no parâmetro R_t do experimento 4, onde ocorreu o inverso. Foi notado que a rugosidade R_a se mostra mais constante, enquanto R_t e R_z são mais sensíveis às variações do estado de fornecimento e do avanço.

Ao considerar o desvio-padrão, é possível afirmar que os resultados são estatisticamente similares dentro de um mesmo experimento. No entanto, foi

observada uma maior dispersão dos dados entre os três experimentos, indicando a inexistência de significância estatística.

Figura 27 - Rugosidades Ra, Rt e RZ – fn variando x Vc fixa 180 m/min



Fonte: Próprio autor, 2023.

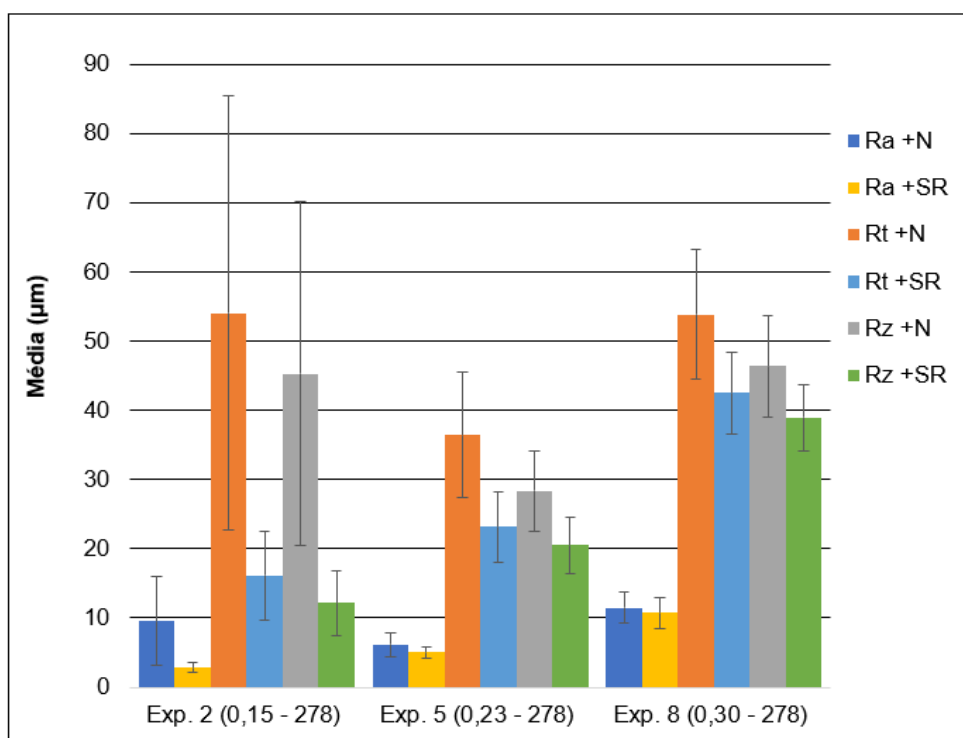
Observa-se na Figura 28 correspondente ao bloco com a velocidade de corte fixada em 278 m/min, de maneira geral, os experimentos no estado de fornecimento +SR destacaram-se de forma mais homogênea em relação aos experimentos no estado de fornecimento +N, exibindo menores rugosidades médias e menores dispersão dos dados.

Ao considerar isoladamente o estado de fornecimento +N, conforme apresentado na Figura 28, o experimento 5 (0,23 - 278) exibiu as menores rugosidades médias e a menor dispersão dos dados em função do desvio-padrão. De modo geral, é possível notar que, para o experimento 2 (015 - 278), nos três parâmetros de rugosidade com tratamento +N, a variabilidade dentro da amostra é extremamente elevada. Isso revela dados altamente heterogêneos, com alta dispersão na informação e maior sensibilidade na análise.

Para o estado de fornecimento +SR, o experimento 2 (0,15 – 278) apresentou valores de rugosidade média mais homogêneos e com menor variabilidade dos dados em comparação aos experimentos 5 (0,23 - 278) e 8 (0,30 - 278).

É possível afirmar que existe significância estatística ao considerar o desvio-padrão dentro de um mesmo experimento. No entanto, a existência de significância estatística entre os três experimentos é complexa e inconclusiva.

Figura 28 - Rugosidades Ra, Rt e RZ – fn variando x Vc fixa 278 m/min



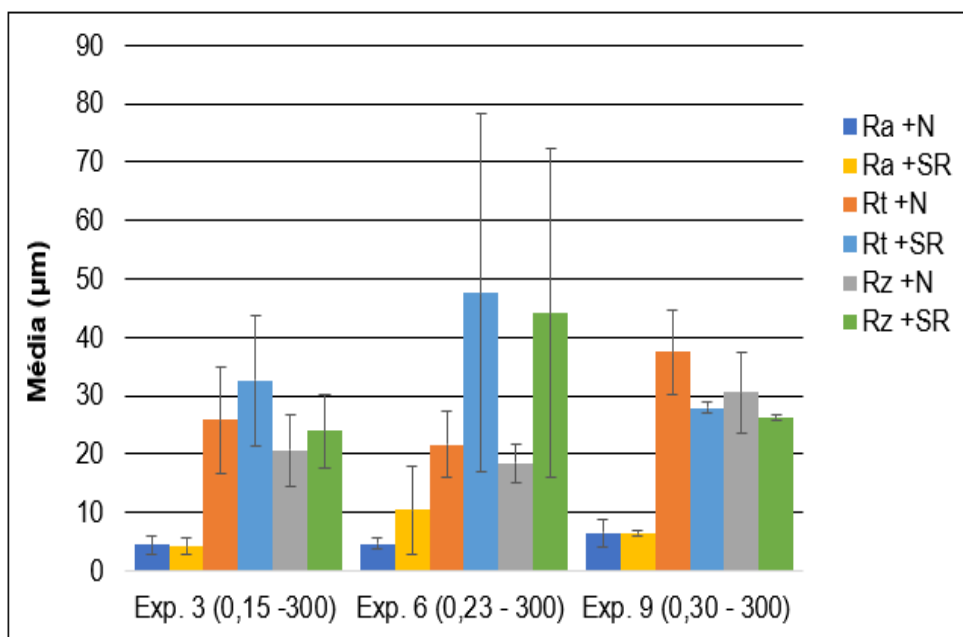
Fonte: Próprio autor, 2023.

Finalmente, a Figura 29 mostra o bloco com a velocidade de corte mantida em 300 m/min. De forma geral, os resultados no estado de fornecimento normalizado (+N) registraram médias de rugosidade inferiores em comparação com os experimentos no estado de fornecimento com alívio de tensão (+SR). No entanto, no experimento 9 (0,30 – 300) do estado de fornecimento +SR, observou-se uma menor média de rugosidade. Cabe ressaltar que o experimento 9 não apresentou uma boa performance em ambos os estados de fornecimento, atingindo o desgaste de flanco máximo planejado no primeiro passe de usinagem para o estado +SR e no segundo passe para o estado +N.

Ao considerar os experimentos no estado de fornecimento +N, os experimentos 3 (0,15 – 300) e 6 (0,23 – 300) destacaram-se pelos resultados mais homogêneos, com menores rugosidades médias. Por outro lado, no estado de fornecimento +SR, os experimentos 3 (0,15 – 300) e 9 (0,30 – 300) apresentaram os melhores resultados de rugosidade média, enquanto no experimento 6, todos os três parâmetros de rugosidade apresentam uma variabilidade significativa entre +N e +SR, com um aumento da média (μm) em todos os casos. Esse aumento é mais acentuado para R_t e R_z . Além disso, nestas duas rugosidades com maior variabilidade, observa-se uma maior amplitude dos dados.

Ao considerar o desvio-padrão, é possível afirmar que os resultados são estatisticamente similares tanto dentro de um mesmo experimento quanto entre os três experimentos.

Figura 29 - Rugosidades R_a , R_t e R_z – f_n variando x V_c fixa 300 m/min



Fonte: Próprio autor, 2023.

De modo geral, observa-se uma tendência de aumento na rugosidade à medida que o avanço é incrementado, o que está alinhado com as considerações de MACHADO et al. (2015). Esses estudos apontam o avanço como o parâmetro mais influente entre as condições de corte.

5.5.2 Análise da Rugosidade em função do volume Usinado (Q) por meio da média

A rugosidade por volume usinado desempenha um papel fundamental na avaliação da qualidade da superfície de materiais nos processos de usinagem, bem como o rendimento e vida útil das ferramentas de corte. Assim, ao observar os gráficos dos parâmetros de rugosidade R_a , R_t e R_z associados ao tratamento térmico de normalização (+N) apresentados nas Figuras 30, 31 e 32, é evidente uma geometria gráfica semelhante em todos eles, caracterizada por períodos de estabilidade e uma tendência geral de aumento da rugosidade média conforme o volume usinado cresce. Essa observação sugere que, à medida que mais material é removido durante o processo de usinagem, a superfície tende a tornar-se mais áspera, indicando a possível contribuição do desgaste da ferramenta e/ou interações entre a ferramenta e o material para o aumento da rugosidade.

Existe uma exceção no experimento 2 (015 – 278), o qual apresenta um comportamento distinto dos demais. Este experimento exibiu inicialmente níveis mais elevados de rugosidade nos volumes iniciais removidos, seguido por uma queda acentuada e subsequente estabilização nos demais volumes removidos. Entretanto, como mencionado anteriormente na seção 5.5.1, esse comportamento atípico foi explicado pela ocorrência de desgaste no assento da pastilha, resultando em vibrações no processo e levando a valores elevados de rugosidade e desvio padrão. Com a substituição do suporte da pastilha de usinagem, o processo se estabilizou conforme o esperado.

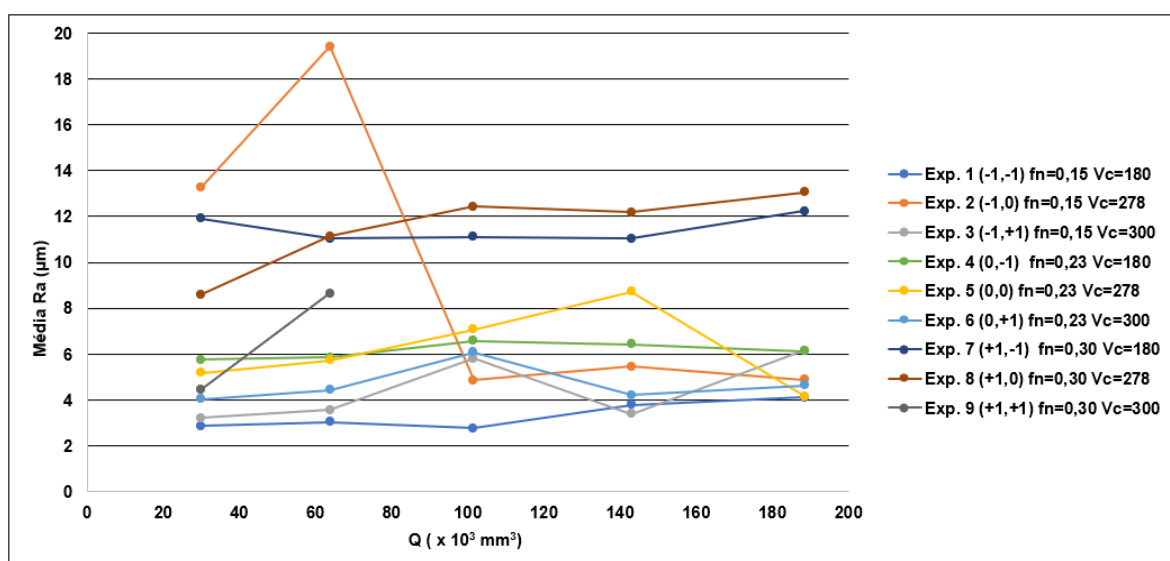
Na Figura 30 é demonstrado a evolução dos valores médios do desvio aritmético médio do perfil em avaliação (R_a) para os experimentos no estado de fornecimento normalizado (+N) em função do volume de material removido, onde pode ser observado o comportamento da rugosidade à medida que o volume de material removido aumenta.

Ao analisar os resultados do conjunto de experimentos, considerando os corpos de prova do tratamento térmico de normalização (+N), é possível constatar que a rugosidade por volume usinado, no parâmetro de rugosidade R_a , varia consideravelmente em diferentes combinações de parâmetros de usinagem. Por exemplo, no experimento 1 (-1,-1), com $f_n = 0,15$ mm/rot e $V_c = 180$ m/min, apresentou o menor valor médio de R_a , $3,31 \mu\text{m}$, enquanto nos experimentos 7 (+1,- 1) com $f_n = 0,30$ mm/rot e $V_c = 180$ m/min e 8 (+1,0) com $f_n = 0,30$ mm/rot e $V_c = 278$ m/min,

os maiores valores médios de Ra foram 11,47 μm e 11,48 μm , respectivamente. Esses resultados indicam que a combinação de diferentes parâmetros de usinagem exerce uma influência significativa na rugosidade das peças usinadas, destacando especialmente a influência do fator avanço, que demonstra uma tendência de maior rugosidade.

O bloco de experimentos com avanço fixado em 0,15 mm/rot apresentou os melhores resultados, com menores rugosidades iniciais e ao longo dos demais passes de torneamento, à medida que o material é removido. Mesmo o experimento 2 (015-278), destacou-se, desde que considerando a eliminação da base de dados a causa especial da instabilidade inicial. Em seguida, o bloco de experimentos com avanço fixado em 0,23 mm/rot também demonstrou desempenho positivo. Por outro lado, o bloco com experimentos fixados com avanço de 0,30 mm/rot teve o pior desempenho, e o experimento 9 foi interrompido ao finalizar o segundo passe de usinagem, correspondente ao volume removido de $63,82 \times 10^3 \text{ mm}^3$, devido ao alcance do máximo desgaste previsto de VB 0,300 mm. Campos et al. (2011) realizou uma comparação dos principais efeitos dos parâmetros de corte, como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, sobre os parâmetros de rugosidade Ra, Rz e Rt. Na comparação realizada, constatou-se que o efeito do avanço é relativamente mais significativo do que o da velocidade de corte e da profundidade de corte, onde aumento do avanço resulta em maior ondulação na superfície da peça.

Figura 30 - Rugosidade (Ra) em função do volume usinado (Q) no estado de fornecimento +N



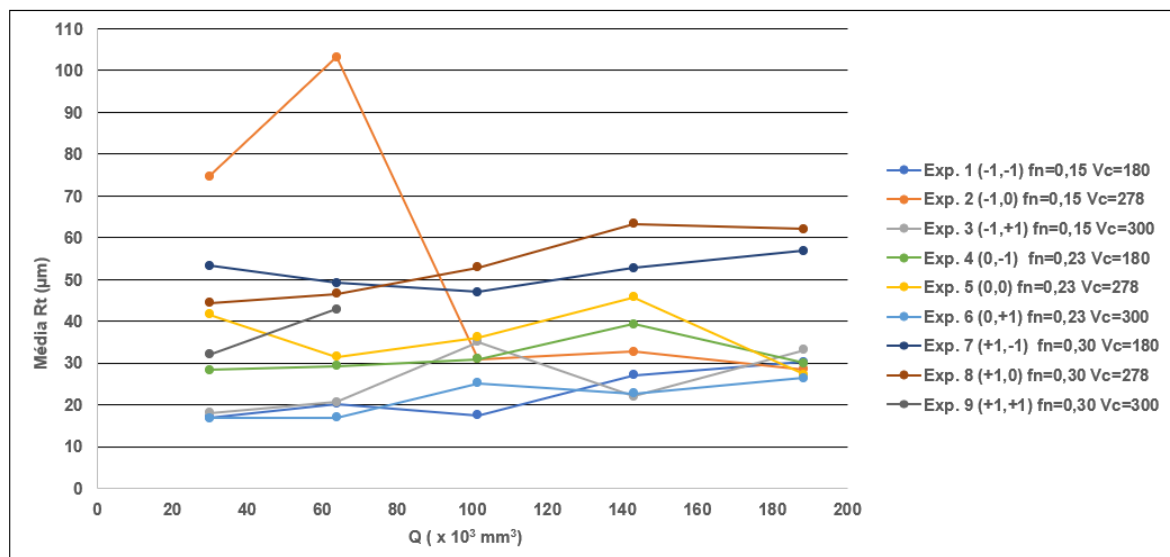
Fonte: Próprio autor, 2023.

Na Figura 31 é ilustrado a evolução dos valores médios da altura total do perfil (R_t) para os experimentos no estado de fornecimento normalizado (+N), em relação ao volume de material removido. Nessa representação gráfica, é possível observar o comportamento da rugosidade à medida que o volume de material removido se incrementa.

Os valores da altura total do perfil (R_t) também variam significativamente entre os diferentes experimentos. Por exemplo, nos experimentos 6 (0,+1), com $f_n = 0,23$ mm/rot e $V_c = 300$ m/min, e 1 (-1,-1), com $f_n = 0,15$ mm/rot e $V_c = 180$ m/min, observaram-se os menores valores médios de $21,63 \mu\text{m}$ e $22,43 \mu\text{m}$, respectivamente. Em contrapartida, nos experimentos 7 (+1,-1), com $f_n = 0,30$ mm/rot e $V_c = 180$ m/min, e 8 (+1,0), com $f_n = 0,30$ mm/rot e $V_c = 278$ m/min, os maiores valores médios foram de $51,86 \mu\text{m}$ e $53,86 \mu\text{m}$, respectivamente.

Conforme mencionado na discussão sobre o parâmetro de rugosidade R_a , o parâmetro R_t apresentou a mesma analogia e comportamento semelhante com R_a e R_z à medida que o volume do material removido aumenta.

Figura 31 - Rugosidade (R_t) em função do volume usinado (Q) no estado de fornecimento +N



Fonte: Próprio autor, 2023.

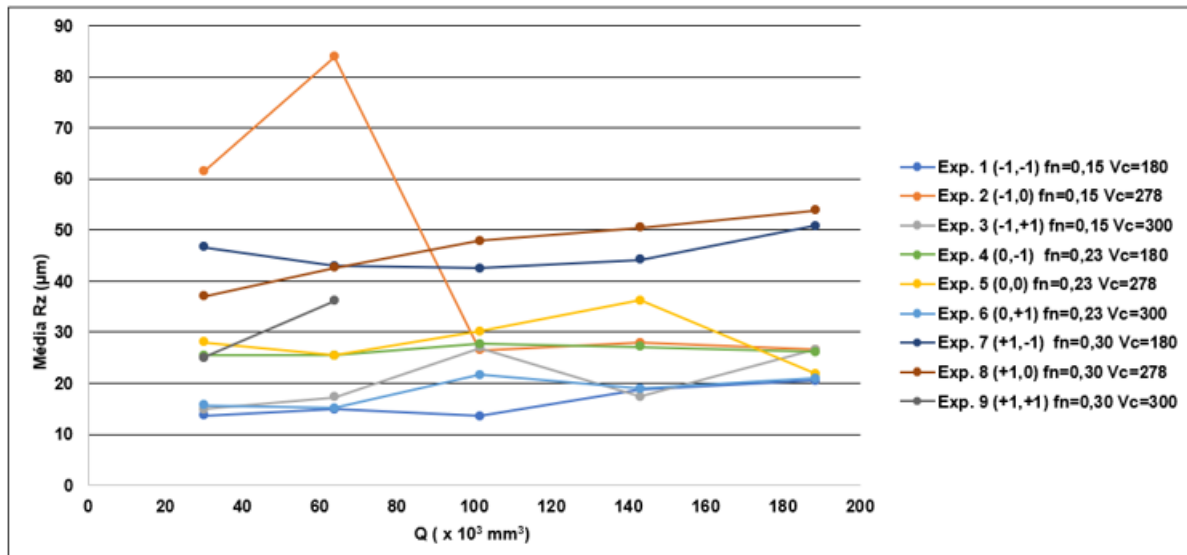
Na Figura 32 observa-se a evolução dos valores médios da altura máxima do perfil (R_z) para os experimentos no estado de fornecimento normalizado (+N), em relação ao volume de material removido. Essa representação gráfica permite observar

como a rugosidade se comporta à medida que o volume de material removido aumenta.

No parâmetro R_z , destaca-se que os experimentos 1 (-1,-1), com $f_n = 0,15$ mm/rot e $V_c = 180$ m/min, e 6 (0,+1), com $f_n = 0,23$ mm/rot e $V_c = 300$ m/min, apresentaram os menores valores médios de $16,28 \mu\text{m}$ e $18,46 \mu\text{m}$, respectivamente. Por outro lado, os experimentos 2 (-1,0), com $f_n = 0,15$ mm/rot e $V_c = 278$ m/min, 7 (+1,-1), com $f_n = 0,30$ mm/rot e $V_c = 180$ m/min, e 8 (+1,0), com $f_n = 0,30$ mm/rot e $V_c = 278$ m/min, exibiram os maiores valores médios de $45,26 \mu\text{m}$, $45,41 \mu\text{m}$ e $46,34 \mu\text{m}$, respectivamente.

Essa análise destaca como diferentes condições de usinagem influenciam a amplitude das irregularidades nas superfícies usinadas. De maneira análoga ao discutido para o parâmetro de rugosidade R_a , verifica-se que o parâmetro R_z segue uma similaridade de comportamento à medida que o volume de material removido aumenta.

Figura 32 - Rugosidade (R_z) em função do volume usinado (Q) no estado de fornecimento +N



Fonte: Próprio autor, 2023.

Observa-se que nos experimentos com tratamento térmico de alívio de tensão (+SR), os gráficos são apresentados nas Figuras 33, 34 e 35 que exibem uma variação menos linear. Para os volumes usinados menores, ou seja, os iniciais, a rugosidade média é relativamente alta, diminuindo à medida que o volume usinado aumenta. Este comportamento é oposto ao observado nos experimentos com

tratamento térmico de normalização (+N). Essa observação sugere que, nas configurações iniciais de usinagem, há uma maior variabilidade na rugosidade. No entanto, à medida que o processo avança e mais material é removido, a estabilidade do processo tende a aumentar, resultando em uma diminuição da rugosidade média.

Esse padrão é especialmente interessante e mais evidente nos experimentos 1 (015 – 180), 2 (0,15 – 278) e 5 (023 – 278) em todos os três parâmetros de rugosidade. Isso sugere uma projeção de que os inserts de corte poderiam continuar usinando de forma eficaz, resultando em melhor desempenho em comparação com os demais experimentos.

Ao analisar os resultados do conjunto de experimentos considerando os corpos de provas do tratamento térmico de alívio de tensão (+SR) demonstrados nos gráficos das Figuras 33, 34 e 35, foi observado que os valores médios de Ra, Rt e Rz novamente variam significativamente de acordo com as diferentes combinações de parâmetros de usinagem. Por exemplo, no experimento 1 (-1,-1) com $f_n = 0,15$ mm/rot e $V_c = 180$ m/min, o valor médio de Ra é $2,12\text{ }\mu\text{m}$, enquanto no experimento 8 (+1,0) com $f_n = 0,30$ mm/rot e $V_c = 278$ m/min, o valor médio de Ra é $10,70\text{ }\mu\text{m}$. Em um estudo correlato, Grzesik e Wanat (2005) investigaram o impacto da variação do avanço na qualidade superficial do aço endurecido. Constataram que o valor do parâmetro Ra aumentou de $0,25\text{ }\mu\text{m}$ para $0,57\text{ }\mu\text{m}$ quando o avanço variou de $0,04$ mm/rot para $0,10$ mm/rot. Concluíram que, para alcançar um alto padrão de acabamento superficial, o avanço deveria ser inferior a $0,10$ mm/rot. Ressaltaram ainda que o aumento da velocidade de corte poderia resultar em um aumento das vibrações no sistema máquina-ferramenta-peça.

Os experimentos 1 (015 – 180), 2 (015 – 278), 4 (0,23 – 180) e 5 (0,23 – 278) apresentaram os melhores desempenhos, com os menores valores médios de rugosidades em todos os parâmetros de rugosidade, Ra, Rt e Rz. Por exemplo, os valores médios de Ra são $2,12\text{ }\mu\text{m}$, $2,85\text{ }\mu\text{m}$, $4,73\text{ }\mu\text{m}$ e $5,02\text{ }\mu\text{m}$, respectivamente. O experimento 3 (0,15 – 300) foi interrompido devido ao alcance do máximo desgaste de flanco planejado de $0,30$ mm durante o sexto passe de torneamento, com o volume removido de $126,56 \times 10^3\text{ mm}^3$.

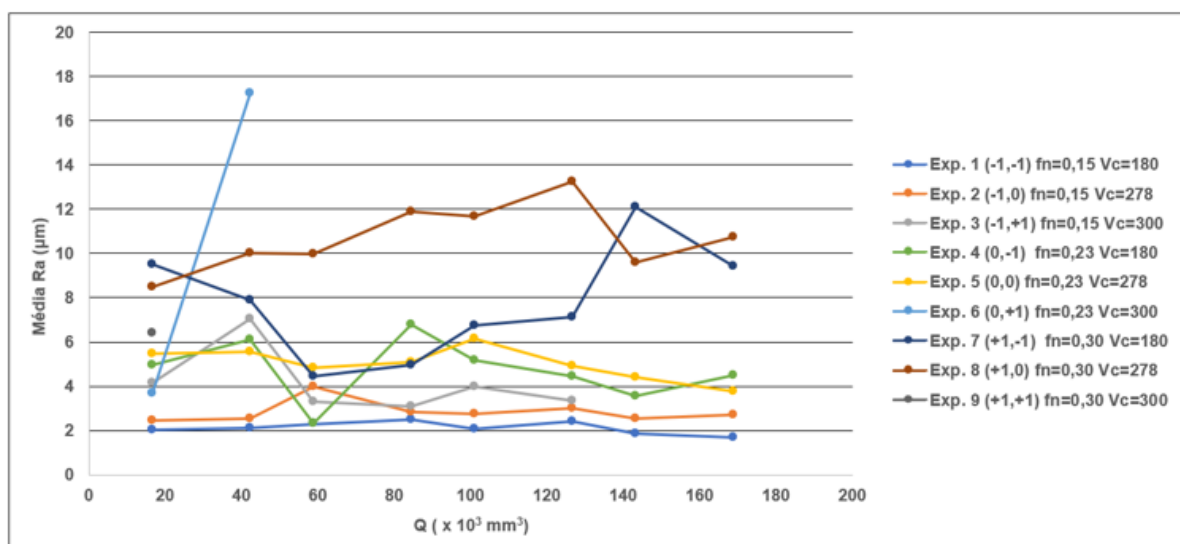
Já os experimentos 6 (0,23 – 300), 7 (0,30 – 180), 8 (0,30 – 278) e 9 (0,30 – 300) foram os menos satisfatórios, apresentando os maiores valores médios de rugosidade em todos os parâmetros de rugosidade. Por exemplo, os valores médios de Ra são $10,46\text{ }\mu\text{m}$, $7,77\text{ }\mu\text{m}$, $10,70\text{ }\mu\text{m}$ e $6,40\text{ }\mu\text{m}$, respectivamente. No

entanto, o experimento 6 foi interrompido durante o segundo passe de torneamento, com o volume removido de $42,19 \times 10^3 \text{ mm}^3$, enquanto o experimento 9 foi finalizado devido à quebra catastrófica ao longo do primeiro passe de torneamento, com o volume removido de cerca de $16,75 \times 10^3 \text{ mm}^3$.

De maneira geral, assim como observado nos experimentos com o tratamento de normalização (+N), no tratamento de alívio de tensão, o bloco dos experimentos com os menores avanços, 0,15 mm/rot e 0,23 mm/rot, apresentaram os melhores resultados. Por outro lado, os experimentos que apresentaram os piores desempenhos foram os realizados com o avanço em 0,30 mm/rot, corroborando com as observações mencionadas anteriormente no estudo do parâmetro de rugosidade R_a dos experimentos no estado +N.

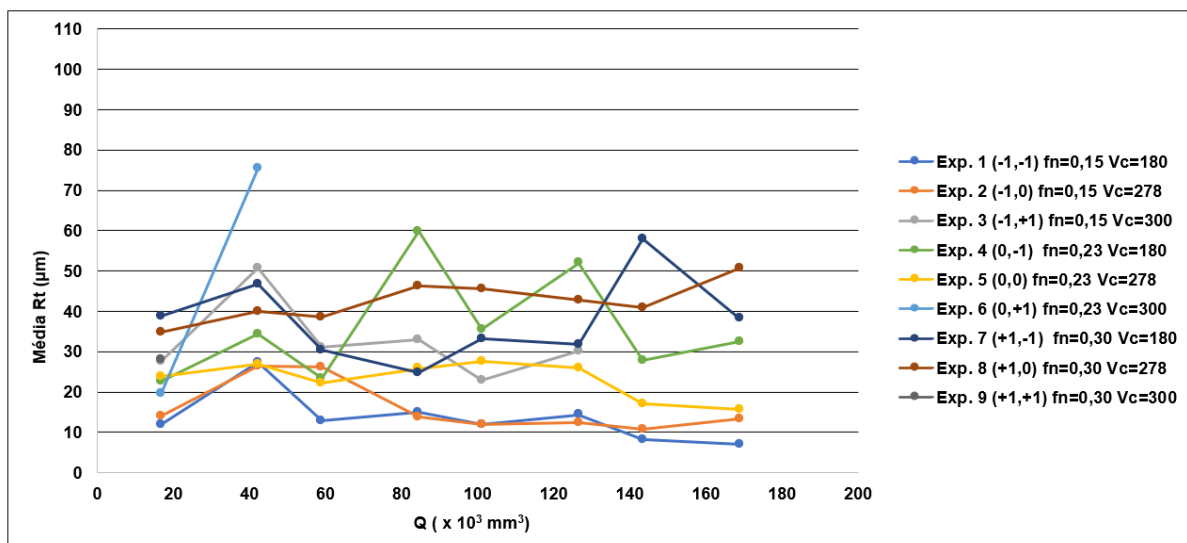
São apresentadas nas Figuras 33, 34 e 35, a evolução dos valores médios dos parâmetros de rugosidades R_a , R_t e R_z para os experimentos no estado de fornecimento com alívio de tensão (+SR) em função do volume de material removido. Essas figuras ilustram o comportamento da rugosidade à medida que o volume de material removido aumenta.

Figura 33 - Rugosidade (R_a) em função do volume usinado (Q) no estado de fornecimento +SR



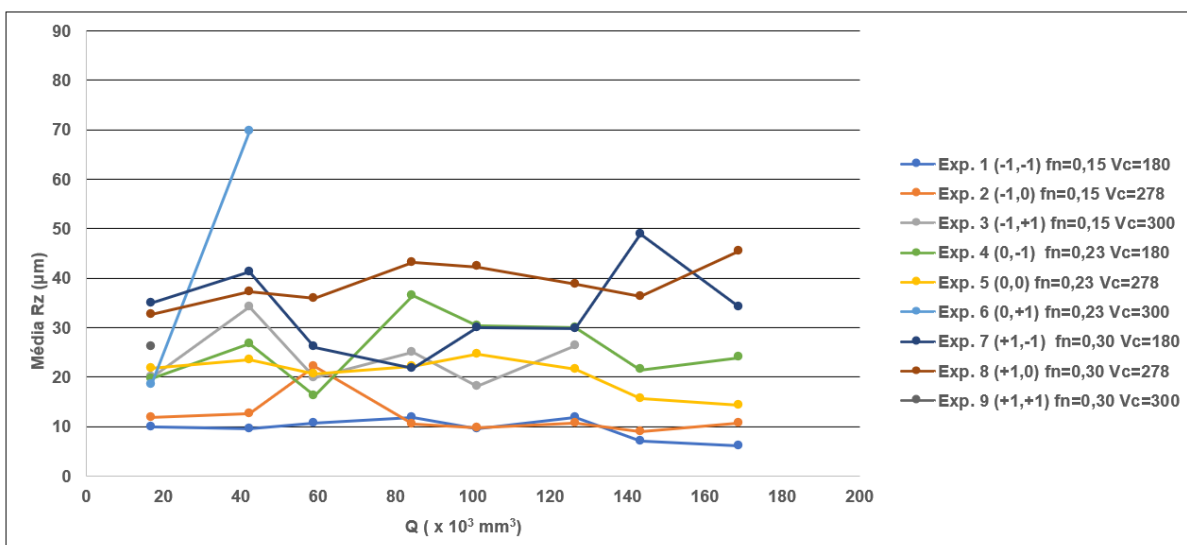
Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 34 - Rugosidade (Rt) em função do volume usinado (Q) no estado de fornecimento +SR



Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 35 - Rugosidade (Rz) em função do volume usinado (Q) no estado de fornecimento +SR



Fonte: Próprio autor, 2023.

Ao comparar os resultados dos dois tratamentos térmicos, observa-se uma tendência de redução na rugosidade média por volume usinado nos experimentos com o tratamento térmico de alívio de tensão (+SR) em comparação com o tratamento de normalização (+N) em diversas combinações de parâmetros de usinagem. Além disso, enquanto o tratamento de normalização (+N) apresenta um aumento geral da rugosidade média com o aumento do volume usinado, o alívio de tensão (+SR) demonstra uma tendência oposta, com redução da rugosidade média à medida que o

volume usinado aumenta. Essas diferenças podem ser atribuídas às mudanças microestruturais induzidas por cada tratamento térmico, influenciando a interação entre a ferramenta e o material. Isso sugere que o tratamento térmico de alívio de tensão pode contribuir para a melhoria da qualidade superficial das peças usinadas, minimizando irregularidades.

Os resultados dos experimentos evidenciam claramente a influência dos diferentes tratamentos térmicos e parâmetros de usinagem na rugosidade média por volume das peças usinadas. A variação nos valores de R_a , R_t e R_z destaca a importância de selecionar cuidadosamente os parâmetros de usinagem para atender aos requisitos de qualidade. Portanto, a escolha do tratamento térmico adequado desempenha um papel significativo na obtenção de superfícies usinadas de alta qualidade, quando combinada com os parâmetros de usinagem, proporcionando uma otimização mais eficaz do processo de usinagem.

5.5.3 Análise de estatística descritiva dos parâmetros de rugosidade R_a , R_t e R_z após usinagem do aço C45

Nas Tabelas 17 e 18 é apresentado os experimentos conduzidos no torneamento cilindro a seco no diâmetro interno para analisar as influências das variáveis independentes avanço e velocidade de corte sobre os parâmetros de rugosidade superficial do material C45 submetido aos tratamentos térmicos de alívio de tensão (+SR) e normalização (+N). Os experimentos foram conduzidos empregando um único tipo de ferramenta de corte, enquanto variavam-se o avanço e a velocidade de corte. A profundidade de corte foi mantida constante para ambos os tipos de tratamentos térmicos.

Tabela 17 - Experimentos conduzidos no processo de torneamento interno a seco para o aço C45 com tratamento térmico de alívio de tensão (+SR)

Experimento	Sequência	Avanço - F_n (mm/rot)	Velocidade de corte - V_c (m/min)
1	3	0,15	180
2	2	0,15	278
3	7	0,15	300
4	6	0,23	180
5	1	0,23	278
6	8	0,23	300
7	5	0,30	180
8	4	0,30	278
9	9	0,30	300

Fonte: Próprio autor, 2023.

Tabela 18 - Experimentos conduzidos no processo de torneamento interno a seco para o aço C45 com tratamento térmico de normalização (+N)

Experimento	Sequência	Avanço - F_n (mm/rot)	Velocidade de corte - V_c (m/min)
1	1	0,15	180
2	4	0,15	278
3	7	0,15	300
4	2	0,23	180
5	5	0,23	278
6	8	0,23	300
7	3	0,30	180
8	6	0,30	278
9	9	0,30	300

Fonte: Próprio autor, 2023.

Conforme destacado por Gomes (1985), o coeficiente de variação (CV) fornece uma indicação da precisão do experimento, sendo uma medida vantajosa para a comparação entre diferentes experimentos, independentemente das unidades utilizadas. Em condições iguais, a precisão é maior no experimento com um coeficiente de variação menor. Entretanto, é importante esclarecer o que constitui essas condições iguais. Uma delas seria a igualdade no número de repetições. Gomes (1991) ressaltou que o número de repetições influencia nos valores do CV, principalmente porque, mesmo que um experimento tenha um coeficiente de variação maior em comparação a outro, que, porém, possui menor número de repetições, aquele com menor coeficiente de variação seria mais preciso. O número de repetições

desempenha um papel importante na avaliação da precisão dos ensaios. Como uma alternativa, Gomes (1991) sugeriu o uso do índice de variação (IV), que é a relação entre o coeficiente de variação (CV) e a raiz quadrada do número de repetições, conforme é expressado na Equação 2.

$$IV = \frac{CV}{\sqrt{N}} \quad (2)$$

Dada a explicação anterior, a decisão foi adotar o índice de variação (IV) na análise estatística descritiva dos parâmetros de rugosidade, em substituição ao coeficiente de variação.

Os resultados representativos de Ra, Rt e Rz estão resumidos na Tabela 19 para os ensaios de torneamento do material C45 +SR e na Tabela 20 para os ensaios de torneamento do material C45 +N. Essas tabelas incluem quatro medidas que compõem a estatística descritiva, conforme proposto por NICK (2007), CONNER e JOHNSON (2017), JIMÉNEZ et al. (2021) e BANARU e AKSENOV (2022): média aritmética ($\bar{x}$), desvio padrão (σ), coeficiente de variação (CV) e índice de variação (IV). Enquanto a média aritmética representa uma medida de tendência central, o desvio padrão, o coeficiente de variação e o índice de variação são medidas de dispersão.

Na Tabela 19 é ilustrado os resultados obtidos para o aço C45 com alívio de tensões (+SR). No que se refere ao parâmetro de rugosidade Ra, os experimentos de 1 a 9 apresentaram índices de variação (IV) variando entre 2,99 % e 29,21 %, com uma amplitude de 26,22 %. Para o parâmetro Rt, os valores do IV oscilaram entre 1,92 % e 26,37 %, com uma amplitude de 24,45 %. Quanto ao parâmetro Rz, os IV variaram de 1,06 % a 26,02 %, perfazendo uma amplitude de 24,97 %.

É relevante destacar que o experimento 6 (fn 0,23 – Vc 300) apresentou o pior índice de variação para todos os parâmetros de rugosidade (Ra, Rt e Rz), registrando 29,21 %, 26,37 % e 26,02 %, respectivamente. Isso evidencia que os parâmetros de usinagem com avanço de 0,23 mm/rot e velocidade de corte de 300 m/min não são adequados para o material C45 (+SR). Importante ressaltar que, ao final do segundo passe de torneamento no experimento 6, o desgaste de flanco atingiu o valor máximo estipulado de VB 0,30 mm, corroborando com o desempenho inferior mencionado.

Por outro lado, o experimento 1 (0,15 – 180) apresentou o melhor resultado para o parâmetro de rugosidade R_a , com um IV de 2,99 %, seguido pelo experimento 5 (0,23 – 278) com IV de 3,26 %. Quanto aos parâmetros de rugosidade R_t e R_z , o experimento 9 (0,30 – 300) demonstrou o melhor desempenho, com valores de IV de 1,93 % e 1,06 %, respectivamente, seguido pelo experimento 8 (0,30 – 278) com IV de 2,86 % para R_t e 2,50 % para R_z .

A discrepância de comportamento observada suscita a consideração de outros efeitos potenciais, tais como:

- De acordo com Machado et al. (2015) e James Dhillip et al. (2020), a rugosidade pode ser influenciada pelas propriedades do material da peça de trabalho. Possíveis disparidades em características mecânicas, como dureza, ou heterogeneidades microestruturais específicas no aço C45 no estado inicial antes da preparação dos corpos de prova, ou seja, após o alívio de tensão, podem desempenhar um papel.

Tabela 19 - Estatística descritiva – Resultados dos parâmetros R_a , R_t e R_z para o aço C45 +SR

Experimento	Avanço - F_n (mm/rot)	Velocidade de corte V_c (m/min)	N Medições	R_a		R_t		R_z	
				CV (%)	IV (%)	CV (%)	IV (%)	CV (%)	IV (%)
1	0,15	180	24	14,64	2,99	45,86	9,36	22,94	4,68
2	0,15	278	24	23,00	4,69	40,07	8,18	38,37	7,83
3	0,15	300	18	34,47	8,12	34,05	8,03	26,74	6,30
4	0,23	180	24	31,90	6,51	42,15	8,60	28,81	5,88
5	0,23	278	24	15,95	3,26	22,32	4,56	19,93	4,07
6	0,23	300	6	71,54	29,21	64,60	26,37	63,74	26,02
7	0,30	180	24	31,70	6,47	27,40	5,59	25,41	5,19
8	0,30	278	24	20,43	4,17	14,03	2,86	12,26	2,50
9	0,30	300	3	8,48	4,90	3,33	1,92	1,83	1,06

Fonte: Próprio autor, 2023.

Na Tabela 20 é apresentado uma visão abrangente dos corpos de prova do aço C45 normalizado (+N). Os resultados do parâmetro de rugosidade R_a (Desvio Aritmético Médio) exibiram um índice de variação (IV) variando entre 2,01 % e 17,54 %, com uma amplitude de 15,53 %. No que se refere ao parâmetro R_t , os valores de IV oscilaram entre 2,69 % e 15,00 %. No contexto do parâmetro R_z , os

valores de IV variaram de 2,45 % a 14,48 %, apresentando uma amplitude de 11,73 %.

De maneira geral, destaca-se o experimento 7 (0,30 – 180) como o mais eficiente, apresentando índices de variação (IV) de 2,01 % para o parâmetro de rugosidade Ra, 2,69 % para a Rt e 2,66 % para Rz. O experimento 4 (0,23 – 180) também demonstrou bom desempenho, com IV de 2,73 %, 6,00 % e 2,45 % para os parâmetros Ra, Rt e Rz, respectivamente. Importante notar que ambos os experimentos mantiveram a velocidade de corte constante em 180 m/min, enquanto o avanço variou do valor central de 0,23 mm/rot para o maior valor de 0,30 mm/rot. Essa configuração dos parâmetros de usinagem, com a menor velocidade de corte, juntamente com os valores central e máximo de avanço, contribuiu para um desempenho superior em relação aos demais experimentos do material C45 normalizado (+N).

No experimento 2 (0,15 – 278), foram observados os piores índices de variação (IV) com valores de 17,54 %, 15,00 % e 14,18 % para os parâmetros Ra, Rt e Rz, respectivamente. O experimento 9 também apresentou índices de variação significativos, registrando 14,76 %, 7,76 % e 9,16 % para os parâmetros Ra, Rt e Rz, respectivamente.

Durante o segundo passe de usinagem do experimento 2, identificou-se um considerável aumento nos índices de variação em comparação com os demais experimentos sugere uma influência significativa causada pelo desgaste no assento da pastilha do suporte de fixação, uma vez que as rugosidades medidas no primeiro e segundo passes de usinagem foram, em média, de 13,27 μm e 19,40 μm , respectivamente. Após a substituição do suporte, os valores medidos para as rugosidades caíram substancialmente, ficando em média entre 4,85 μm e 5,47 μm nos três passes de usinagem subsequentes. Essas mesmas características identificadas na Ra do experimento 2 também foram observadas nos parâmetros Rt e Rz.

O experimento 9 (0,30 – 300) foi interrompido após a conclusão do segundo passe de usinagem, quando o desgaste de flanco do inserto de corte atingiu o valor máximo definido de VB 0,30 mm, sem que ocorresse quebra catastrófica. É interessante observar que um fenômeno semelhante foi registrado no mesmo experimento 9 (fn 0,30 – Vc 300) para o material com tratamento térmico de Alívio de Tensão (+SR), o que sugere a influência dos parâmetros de usinagem na configuração com maior avanço e velocidade de corte.

Tabela 20 - Estatística descritiva – Resultados dos parâmetros Ra, Rt e Rz para o aço C45 +N

Experimento	Avanço - F_n (mm/rot)	Velocidade de corte V_c (m/min)	N Medições	R_a		R_t		R_z	
				CV (%)	IV (%)	CV (%)	IV (%)	CV (%)	IV (%)
1	0,15	180	15	17,67	4,56	27,10	7,00	19,84	5,12
2	0,15	278	15	67,94	17,54	58,09	15,00	54,91	14,18
3	0,15	300	15	32,82	8,47	34,88	9,01	29,47	7,61
4	0,23	180	15	10,57	2,73	23,22	6,00	9,49	2,45
5	0,23	278	15	27,63	7,13	25,04	6,47	20,36	5,26
6	0,23	300	15	18,10	4,67	26,12	6,74	18,14	4,68
7	0,30	180	15	7,80	2,01	10,41	2,69	10,31	2,66
8	0,30	278	15	18,87	4,87	17,26	4,46	15,93	4,11
9	0,30	300	6	36,15	14,76	19,02	7,76	22,43	9,16

Fonte: Próprio autor, 2023.

Observou-se nas análises dos gráficos nos tópicos 5.5.1 (Análise dos valores das rugosidades em função dos parâmetros de usinagem avanço e velocidade de corte por meio da média e desvio padrão) e 5.5.2 (Análise da rugosidade em função do volume usinado (Q) por meio da média) uma tendência de melhor desempenho para o aço C45 nos experimentos com o estado de fornecimento com alívio de tensão (+SR). Essas análises, considerando a média das rugosidades e o desvio padrão, sugerem que o material com tratamento térmico de alívio de tensão apresenta, em geral, resultados mais favoráveis.

No entanto, ao analisar as Tabelas 20 e 21, que consideram o índice de variação (IV), uma tendência de melhor desempenho é observada para os experimentos no estado de fornecimento normalizado (+N). Esses experimentos exibiram as menores médias e amplitudes de IV em todos os parâmetros de rugosidades R_a , R_t e R_z . Essa observação destaca a complexidade do processo de usinagem e a importância de escolher indicadores adequados, como média, desvio padrão ou índice de variação, dependendo da aplicação específica em campo.

5.5.4 Correlação entre os níveis de Rugosidade R_a , R_t e R_z no experimento com o tratamento térmico de normalização (+N)

A análise das correlações entre os níveis de rugosidade (R_a , R_t e R_z) para o material no estado de fornecimento normalizado, em conjunto com os experimentos realizados, proporcionou uma compreensão aprofundada de como diferentes variáveis podem estar inter-relacionadas e influenciar os resultados. Nos gráficos de

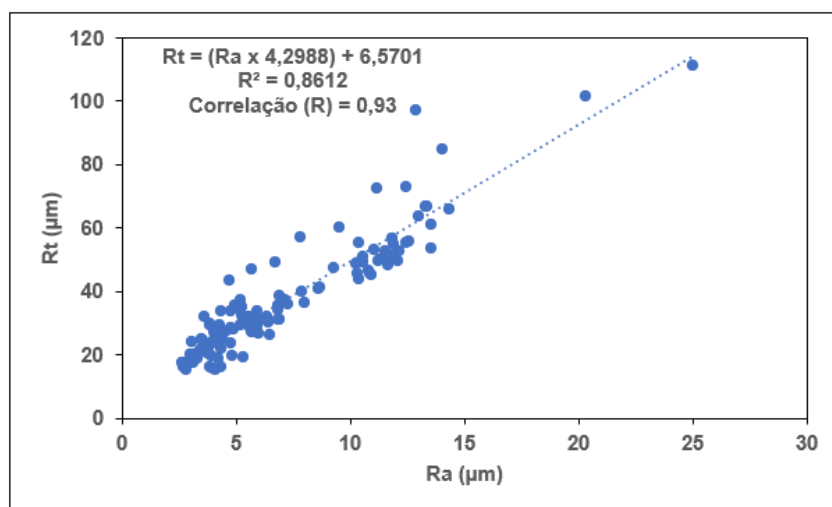
dispersão, Figuras 36, 37 e 38 que representam essas correlações, foi possível observar os padrões de comportamento dessas variáveis ao longo dos diversos experimentos.

O coeficiente de determinação (R^2) é uma métrica onde o número que varia entre 0 e 1, indicando o percentual da variância de uma variável que pode ser explicado a partir do valor da outra. Quando R^2 é igual a 1, significa que a variável independente X pode explicar totalmente a variável dependente Y. Esse coeficiente é usado para avaliar a qualidade do ajustamento de uma linha de regressão, sendo maior quando os dados estão mais próximos da linha de tendência. Em contraste, quando os dados estão dispersos, o R^2 é menor.

Por outro lado, o coeficiente de correlação de Pearson (R) está relacionado ao R^2 , mas são diferentes, é uma medida que mostra a intensidade da relação linear entre duas variáveis, como no caso da relação entre R_t e R_a . Este coeficiente pode assumir valores positivos ou negativos, variando de -1 a +1. Ele mede apenas a dependência linear, ao contrário do R^2 , que mede percentualmente. Quando $R = 1$, indica uma correlação linear positiva perfeita; quando $R = -1$, há uma correlação linear negativa perfeita; e quando $R = 0$, não há correlação linear.

Ao observar a Figura 36, nota-se uma correlação caracterizada por uma proporção linear positiva, com um valor de $R = 0,93$. Isso indica que, à medida que o parâmetro de rugosidade média (R_a) aumenta, a altura total do perfil de rugosidade (R_t) também tende a aumentar. Aproximadamente 86 % da variabilidade na inclinação da rugosidade R_t pode ser explicada pela variabilidade da rugosidade R_a , e vice-versa. Os 14 % restantes podem ser atribuídos a outros fatores não medidos no presente estudo, como força de corte, temperatura, medições adicionais de dureza em 100 % dos corpos de prova, entre outros.

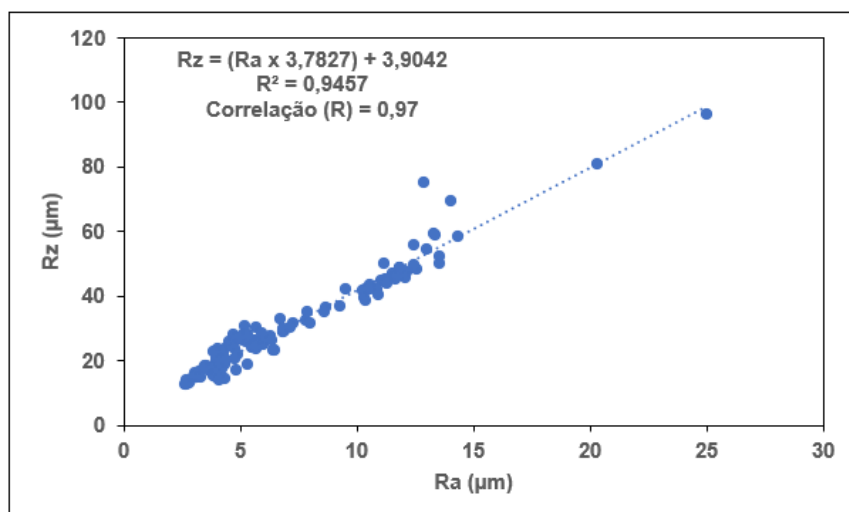
Figura 36 - Gráfico de correlação do parâmetro de Rugosidade (Rt) em função de Ra no estado de fornecimento +N



Fonte: Próprio autor, 2023.

Na Figura 37 é evidenciado uma correlação linear no valor de 0,97 entre o parâmetro de rugosidade máxima do perfil (Rz) e o parâmetro de rugosidade média (Ra). Isso indica que, à medida que a rugosidade média (Ra) aumenta, o parâmetro de rugosidade máxima (Rz) também tende a aumentar. Aproximadamente 95 % da variação na inclinação da rugosidade Rz pode ser explicada pela variação na rugosidade Ra, e vice-versa. Os 5 % restantes podem ser atribuídos a outros fatores não abordados neste estudo.

Figura 37 - Gráfico de correlação do parâmetro de Rugosidade (Rz) em função de Ra no estado de fornecimento +N

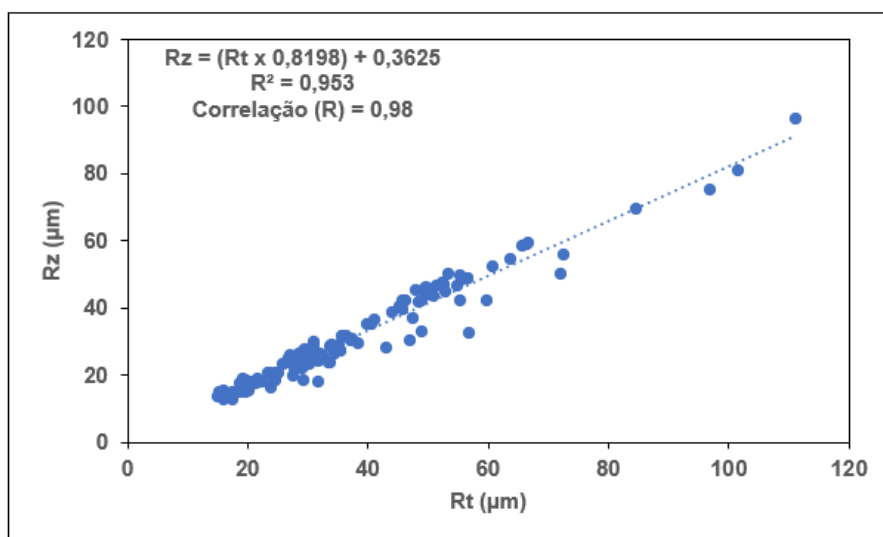


Fonte: Próprio autor, 2023.

Observa-se na Figura 38 uma correlação positiva de 0,98, entre o parâmetro de rugosidade altura total do perfil (R_t) e o parâmetro de rugosidade máxima do perfil (R_z), indicando uma relação coesa entre R_t e R_z . Essa observação sugere que, em linhas gerais, quanto maior a amplitude das variações de altura na superfície (R_t), maior será a altura máxima dos picos e a profundidade dos vales (R_z). Essa relação faz sentido, considerando que áreas com maior amplitude de variação tendem a apresentar irregularidades mais pronunciadas.

Cerca de 95 % da variação na inclinação da rugosidade R_z pode ser explicada pela variação na rugosidade R_t , e vice-versa. Os 5 % restantes podem ser atribuídos a outros fatores não abordados no presente estudo.

Figura 38 - Gráfico de correlação do parâmetro de Rugosidade (R_t) em função de R_z no estado de fornecimento +N



Fonte: Próprio autor, 2023.

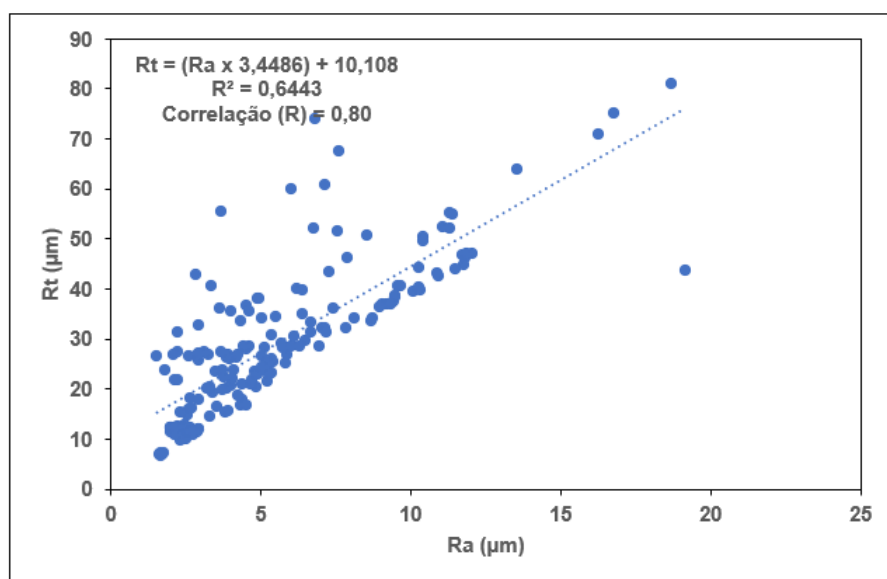
5.5.5 Correlação entre os níveis de Rugosidade R_a , R_t e R_z no experimento com o tratamento térmico de alívio de tensão (+SR)

Observa-se na Figura 39 que representa a correlação entre R_a e R_t , uma relação linear positiva de 0,80 entre esses parâmetros de rugosidade. Isso sugere que, de maneira geral, à medida que o parâmetro de rugosidade desvio aritmético médio do perfil (R_a) aumenta, a altura total do perfil (R_t) também tende a ser maior.

Aproximadamente 64 % da variação na inclinação da rugosidade R_t pode ser explicada pela variação na rugosidade R_a , e vice-versa. Os 36 % restantes podem ser atribuídos a outros fatores não considerados no presente estudo.

É importante notar uma menor correlação entre os parâmetros de rugosidade R_a e R_t (0,80) para o estado de fornecimento +SR, em comparação com os mesmos parâmetros no estado de fornecimento +N, que apresentou uma correlação muito forte de 0,93. Além disso, observa-se uma dispersão maior dos pontos em relação à linha de regressão, indicando uma maior variabilidade, o que é consistente com o R^2 de 64 %. Essa comparação destaca que o estado +N indica estar mais ajustado para o estudo da correlação entre os parâmetros de rugosidade R_a e R_t em comparação ao estado +SR.

Figura 39 - Gráfico de correlação do parâmetro de Rugosidade (R_t) em função de R_a no estado de fornecimento +SR



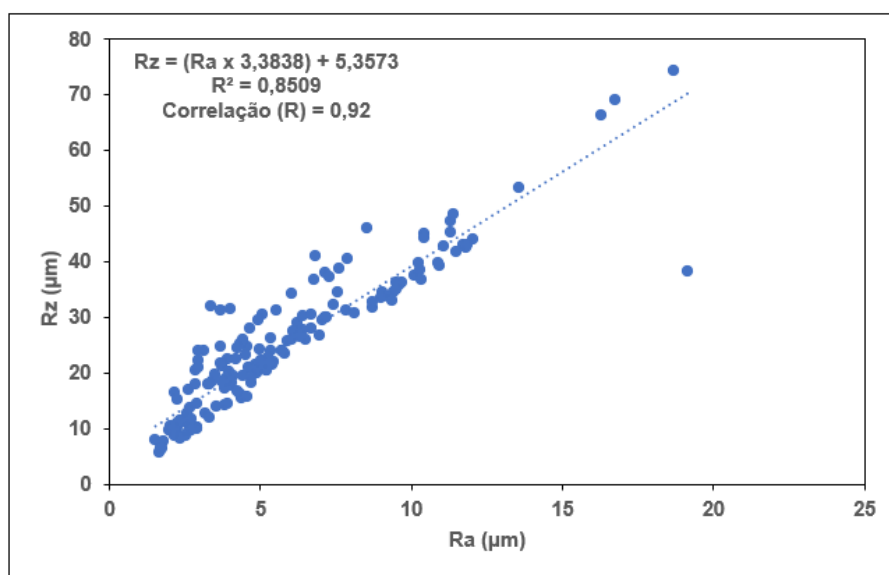
Fonte: Próprio autor, 2023.

Na Figura 40 é mostrado uma correlação positiva de 0,92 entre R_z e R_a , indicando que, quando o parâmetro de rugosidade máxima do perfil (R_z) é maior, o parâmetro de rugosidade desvio aritmético médio do perfil (R_a) também tende a ser maior. Essa relação sugere que superfícies com alturas máximas dos picos e profundidade de irregularidades mais pronunciadas tendem a apresentar uma rugosidade média mais elevada.

Cerca de 85 % da variação na inclinação da rugosidade R_z pode ser explicada pela variação na rugosidade R_a , e vice-versa. Os 15 % restantes podem ser atribuídos a outros fatores não considerados no presente estudo.

É importante destacar que, para o estudo da correlação entre os parâmetros de rugosidades R_z x R_a no estado de fornecimento +SR, o coeficiente de determinação R^2 foi de 85 %, indicando uma dispersão maior dos pontos em comparação com os mesmos parâmetros no estado de fornecimento +N, que apresentou um R^2 de 95 %. Essa comparação sugere que o estado +N parece oferecer um ajuste mais preciso para o estudo da correlação entre R_z e R_a em comparação ao estado +SR.

Figura 40 - Gráfico de correlação do parâmetro de Rugosidade (R_z) em função de R_a no estado de fornecimento +SR



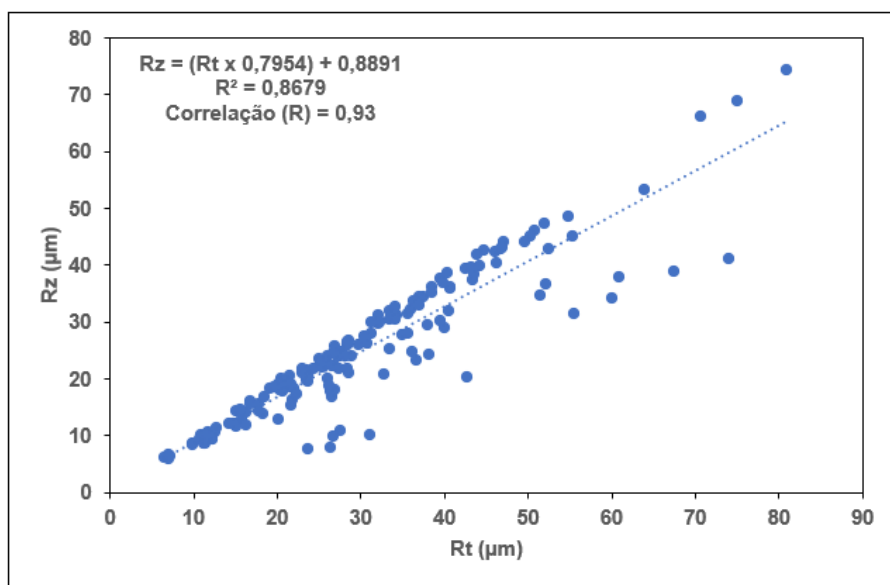
Fonte: Próprio autor, 2023.

Na Figura 41 observa-se uma correlação positiva no valor de 0,93 entre R_t e R_z sugere que, quando o parâmetro de rugosidade altura total do perfil (R_t) aumenta, o parâmetro de rugosidade máxima do perfil (R_z) também tende a aumentar. Essa correlação pode ser explicada pelo fato de que um aumento na rugosidade total pode resultar de picos e vales mais pronunciados na superfície.

É relevante observar que, para o estudo de correlação entre os parâmetros de rugosidades R_z x R_t no estado de fornecimento +SR, o coeficiente de determinação R^2 foi de 87 %, indicando uma dispersão maior dos pontos em comparação com os

mesmos parâmetros no estado de fornecimento +N, que apresentou um R^2 de 95 %. Essa comparação sugere que o estado +N indica oferecer um ajuste mais preciso para o estudo da correlação entre Rz e Rt em comparação ao estado +SR.

Figura 41 - Gráfico de correlação do parâmetro de Rugosidade (Rt) em função de Rz no estado de fornecimento +SR



Fonte: Próprio autor, 2023.

5.5.6 Análise de estatística inferencial dos parâmetros de rugosidade Ra, Rt e Rz após usinagem do aço C45

Nesta seção, são destacados os principais resultados obtidos, com uma descrição detalhada da metodologia estatística aplicada para análise dos dados.

5.5.7 Variáveis dependentes (respostas) e independentes

Os dados foram analisados considerando duas variáveis dependentes e três variáveis explicativas, sendo modeladas de forma distinta. As variáveis respostas correspondem às rugosidades Ra, Rt e Rz após o processo de usinagem do aço C45. Tais medidas de rugosidade, nomeadamente Ra, Rt e Rz, são parâmetros convencionalmente empregados na avaliação da superfície de peças usinadas.

No contexto deste estudo, as variáveis independentes incluem a velocidade de corte em metros por minuto e o avanço em milímetros por rotação. Ambas as variáveis

são consideradas fatores e são delineadas em três níveis, conforme é apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 - Variáveis independentes utilizadas no modelo

Variável independente	Níveis	Valores
Velocidade	3	180; 278; 300
Avanço	3	0,15; 0,23; 0,30

Fonte: Próprio autor, 2023.

5.5.8 Análise de variância (ANOVA)

As hipóteses testadas na ANOVA são as seguintes:

- A hipótese nula afirma que não há diferença entre as médias dos grupos;
- A hipótese alternativa propõe que existe diferença em pelo menos um dos grupos estudados.

A decisão sobre qual hipótese aceitar foi baseada no valor-p. Sendo o valor-p menor que o nível de significância previamente estabelecido (0,05 ou 5 %, adotado neste estudo), a hipótese nula é rejeitada, indicando que existe uma diferença estatisticamente significativa entre os grupos. Em outras palavras, é improvável que as diferenças observadas tenham ocorrido por acaso. Se o valor-p for maior que o nível de significância, não é possível rejeitar a hipótese nula, concluindo que não há uma diferença estatisticamente significativa entre os grupos.

5.5.8.1 Análise do aço C45 no estado de fornecimento de alívio de tensão (+SR)

Nas Tabelas 22, 23 e 24, encontra-se a análise de variância (ANOVA) considerando os parâmetros de rugosidade R_a , R_t e R_z como variáveis dependentes. O experimento abrange um total de 170 observações distribuídas em distintos grupos ou tratamentos.

O modelo global para os três níveis de rugosidade, ou seja, o modelo que considera todas as variáveis e suas iterações apresentou o valor-P igual a 0,000 para os três níveis de rugosidade o que confirma a significância estatística do modelo como um todo a um nível de 5 % de significância. Isso sugere que pelo menos uma das

variáveis independentes (fatores) tem um impacto significativo na variável dependente, ou seja, em pelo menos um dos grupos analisados, a média dos três níveis de rugosidade é estatisticamente diferente. Esses resultados estão de acordo com o apresentado por Hair et al. (2013).

A análise individual do avanço e da velocidade de corte para os três níveis de rugosidade, mostrou que tanto a velocidade de corte quanto o avanço são fatores significativos, com p-valor inferior ao nível de significância dos avanços dos níveis de rugosidade Ra, Rt e Rz respectivamente de 0,000, 0,000 e 0,000, enquanto o valor-P das velocidades de corte para os níveis de rugosidade Ra, Rt e Rz foi respectivamente 0,000, 0,011 e 0,000. Assim, a velocidade de corte e o avanço são fatores significativos, indicando que ambas as variáveis têm um efeito estatisticamente significativo na variável dependente. Em outras palavras, em pelo menos um dos grupos de fatores das variáveis velocidade de corte (180; 278; 300) m/min e avanço (0,15; 0,23; 0,30) mm/rot, a média das rugosidades é estatisticamente diferente das demais. Esse resultado está de acordo com o reportado por Kutner et al. (2005), quando uma variável é considerada significativa, isso indica que ela contribui para a variação da variável dependente, oferecendo percepções importantes para a compreensão do fenômeno estudado.

A análise das interações de dois fatores, velocidade de corte_avanço, mostrou o valor-P de 0,000 para todos os três níveis de rugosidades. A interação entre velocidade de corte e avanço é significativa, indicando que o efeito combinado desses dois fatores na variável dependente é diferente do que seria esperado pela simples soma de seus efeitos individuais. Este resultado está de acordo com o que foi apresentado por Box (1978), sendo considerado crucial o estudo do efeito combinado de duas variáveis, em contraste com a simples soma de seus efeitos individuais, por várias razões, incluindo a investigação da interdependência das variáveis, as quais frequentemente estão interconectadas ou são influenciadas umas pelas outras.

Tabela 22 - Análise de variância – Parâmetro Ra – Aço C45 +SR

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	8	1417,77	177,221	44,59	0,000
Linear	4	693,02	173,254	43,59	0,000
Velocidade	2	93,92	46,958	11,81	0,000
Avanço	2	591,40	295,702	74,40	0,000
Interações de 2 fatores	4	184,12	46,029	11,58	0,000
Velocidade*Avanço	4	184,12	46,029	11,58	0,000
Erro	162	643,90	3,975		
Total	170	2061,67			

Fonte: Próprio autor, 2023.

Tabela 23 - Análise de variância – Parâmetro Rt – Aço C45 +SR

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	8	20171	2521,4	22,84	0,000
Linear	4	7028	1756,9	15,92	0,000
Velocidade	2	1030	515,0	4,66	0,011
Avanço	2	6875	3437,4	31,14	0,000
Interações de 2 fatores	4	4401	1100,2	9,97	0,000
Velocidade*Avanço	4	4401	1100,2	9,97	0,000
Erro	162	17883	110,4		
Total	170	38055			

Fonte: Próprio autor, 2023.

Tabela 24 - Análise de variância – Parâmetro Rz – Aço C45 +SR

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	8	18653,6	2331,70	41,56	0,000
Linear	4	7952,7	1988,16	35,44	0,000
Velocidade	2	982,1	491,07	8,75	0,000
Avanço	2	7839,2	3919,59	69,87	0,000
Interações de 2 fatores	4	2536,3	634,09	11,30	0,000
Velocidade*Avanço	4	2536,3	634,09	11,30	0,000
Erro	162	9088,3	56,10		
Total	170	27741,9			

Fonte: Próprio autor, 2023.

É possível concluir que as análises de variabilidade utilizando a ANOVA para os dados do aço C45 no estado de fornecimento de alívio de tensão indicam que, em todos os cenários de variáveis dependentes (Ra, Rt e Rz), as variáveis explicativas (avanço, velocidade de corte) e a interação entre avanço e velocidade de corte são significativas a um nível de 5 %, indicado pelo Valor-P menor que 0,05. Isso significa que pelo menos um fator de uma das variáveis independentes estudadas tem um efeito significativo na variável dependente (Ra, Rt ou Rz).

5.5.8.2 Análise do aço C45 no estado de fornecimento normalizado (+N)

Nas Tabelas 25, 26 e 27, encontra-se a análise de variância (ANOVA) considerando os parâmetros de rugosidade Ra, Rt e Rz como variáveis dependentes. Um total de 125 observações foi distribuído em distintos grupos ou tratamentos no experimento.

Para as análises do Aço C45 com tratamento térmico de normalização, são obtidos resultados análogos, nos quais o modelo global que considera todas as variáveis é estatisticamente significativo a um nível de 5% de significância nos três parâmetros de rugosidades, Ra, Rz e Rt. Além disso, tanto a velocidade de corte quanto o avanço demonstraram ter um efeito significativo nas diferentes rugosidades conforme. Adicionalmente, a interação entre a velocidade de corte e o avanço também

é significativa nos três diferentes níveis de rugosidade, sugerindo que o efeito combinado desses dois fatores na variável dependente difere do que seria esperado pela simples soma de seus efeitos individuais.

Tabela 25 - Análise de variância – Parâmetro Ra – Aço C45 +N

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	8	1106,0	138,244	20,51	0,000
Linear	4	835,2	208,805	30,98	0,000
Velocidade	2	277,3	138,652	20,57	0,000
Avanço	2	381,8	190,890	28,32	0,000
Interações de 2 fatores	4	236,5	59,117	8,77	0,000
Velocidade*Avanço	4	236,5	59,117	8,77	0,000
Erro	117	788,6	6,740		
Total	125	1894,5			

Fonte: Próprio autor, 2023.

Tabela 26 - Análise de variância – Parâmetro Rt – Aço C45 +N

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	8	20973	2621,6	15,59	0,000
Linear	4	16887	4221,6	25,10	0,000
Velocidade	2	7741	3870,3	23,01	0,000
Avanço	2	5974	2987,2	17,76	0,000
Interações de 2 fatores	4	4029	1007,4	5,99	0,000
Velocidade*Avanço	4	4029	1007,4	5,99	0,000
Erro	117	19679	168,2		
Total	125	40652			

Fonte: Próprio autor, 2023.

Tabela 27 - Análise de variância – Parâmetro Rz – Aço C45 +N

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	8	17341	2167,66	22,40	0,000
Linear	4	13248	3311,96	34,22	0,000
Velocidade	2	5504	2751,76	28,43	0,000
Avanço	2	5170	2585,17	26,71	0,000
Interações de 2 fatores	4	3935	983,66	10,16	0,000
Velocidade*Avanço	4	3935	983,66	10,16	0,000
Erro	117	11323	96,78		
Total	125	28665			

Fonte: Próprio autor, 2023.

Portanto, pode-se concluir, a partir das análises de variabilidade utilizando a ANOVA para os dados do aço C45 com tratamento térmico de normalização, que em todos os cenários de variáveis dependentes (Ra, Rt e Rz), as variáveis explicativas, avanço, velocidade de corte e a interação entre o avanço e a velocidade de corte são significativas a um nível de 5 % de significância, indicado pelo Valor-P menor que o nível de significância (0,05), ou seja, pelo menos um fator de uma das variáveis independentes estudadas tem um efeito significativo na variável dependente (Ra, Rt ou Rz).

5.5.9 Análise de regressão linear múltipla

A avaliação da significância de uma variável em explicar o resultado é realizada por meio de um teste que considera o p-valor. Em termos simples, se o p-valor for menor que o nível de significância pré-determinado (para este estudo, foi adotado um valor de 0,05), então é rejeitada a hipótese de que a variável não é significativa para explicar o resultado, ou seja, ela tem um impacto consistente na reta de regressão. Por outro lado, se o p-valor for maior que o nível de significância, existe evidências para aceitar a hipótese nula, indicando que a variável não tem efeito significativo na análise do resultado da variável dependente.

Com o intuito de avaliar a eficácia do modelo desenvolvido, utilizou-se a métrica R^2 . O coeficiente R-quadrado é uma medida estatística que indica quão próximos os dados estão da linha de regressão ajustada. Também é conhecido como coeficiente de determinação ou coeficiente de determinação múltipla para a regressão múltipla. A definição do R-quadrado é relativamente simples: representa a porcentagem da variação da variável resposta que é explicada pelo modelo linear. Em termos gerais, quanto mais próximo de 100%, melhor o modelo em explicar a variabilidade dos dados (Field, 2000).

5.5.9.1 Análise do modelo de regressão considerando o Aço C45 no estado de fornecimento de alívio de tensão (+SR)

- Parâmetro de rugosidade Ra como variável dependente:

O modelo, no qual a rugosidade Ra foi considerada como variável dependente apresentou a estrutura conforme é expressado na Equação 3:

$$\begin{aligned} Ra = & 6,022 - (1,149 * Vc \ 180) + (0,169 * Vc \ 278) + (0,980 * Vc \ 300) - (2,983 * \\ & fn \ 0,15) + (0,715 * fn \ 0,23) + (2,268 * fn \ 0,30) + (0,231 * Vc \ 180_fn \ 0,15) - \\ & (0,859 * Vc \ 180_fn \ 0,23) + (0,628 * Vc \ 180_fn \ 0,30) - (0,359 * Vc \ 278_fn \ 0,15) - \\ & (1,884 * Vc \ 278_fn \ 0,23) + (2,243 * Vc \ 278_fn \ 0,30) + (0,128 * Vc \ 300_fn \ 0,15) + \\ & (2,743 * Vc \ 300_fn \ 0,23) - (2,871 * Vc \ 300_fn \ 0,30) \end{aligned} \quad (3)$$

Onde:

- Ra é a variável dependente que está sendo modelada.
- As variáveis independentes incluem diferentes os níveis de velocidade de corte (180, 278, 300) m/min e avanço (0,15, 0,23, 0,30) mm/rot.
- Também há termos de interação entre velocidade de corte e avanço (por exemplo, Vc 180_fn 0,15, Vc 278_fn 0,23, etc.).

Na Tabela 28 é exibido as variáveis estimadas nos modelos, incluindo os coeficientes, valores-T e valores-P associados a cada variável, oferecendo informações sobre a significância estatística e a direção da relação entre as variáveis independentes e a variável dependente na equação de regressão. Além disso, são apresentados os VIFs, que medem a multicolinearidade entre as variáveis independentes. A regra geral sugere que um VIF inferior a 5 é considerado aceitável,

enquanto valores acima de 10 indicam multicolinearidade severa e valores entre 5 e 10 são moderados (HAIR et. al., 1998).

Os valores-P menores que 0,05 para as variáveis velocidade de corte 180 m/min, avanço 0,15 mm/rot, avanço 0,23 mm/rot e para as interações Vc 180_fn 0,23 e Vc 278_fn 0,23 indicaram que o intercepto é estatisticamente significativo, sendo importante para explicar os resultados associados à Rugosidade Ra para essas variáveis independentes. Os resultados estão de acordo com o estudo realizado por Gelman et. al. (2006).

Os VIFs, geralmente menores que 5, mostraram baixa multicolinearidade entre as variáveis independentes no modelo. No entanto, é necessária atenção aos VIFs para as variáveis avanço 0,15 mm/rot e avanço 0,23 mm/rot, que apresentaram os maiores valores.

Tabela 28 - Coeficientes – Parâmetro de rugosidade Ra - Aço C45 +SR

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	6,022	0,199	30,29	0,000	
Velocidade					
180	-1,149	0,241	-4,77	0,000	1,27
278	0,169	0,241	0,70	0,485	1,27
Avanço					
0,15	-2,983	0,245	-12,18	0,000	1,75
0,23	0,715	0,276	2,59	0,011	2,02
Velocidade*Avanço					
180 0,15	0,231	0,311	0,74	0,460	1,65
180 0,23	-0,859	0,336	-2,55	0,012	1,62
278 0,15	-0,359	0,311	-1,15	0,250	1,65
278 0,23	-1,884	0,336	-5,60	0,000	1,62

Fonte: Próprio autor, 2023.

Na Tabela 29 é mostrado o resumo contendo os indicadores de desempenho do modelo, considerando a Rugosidade Ra como variável dependente.

O desvio padrão residual é uma medida da dispersão dos resíduos, que são as diferenças entre os valores observados e os valores previstos pelo modelo. Quanto menor o desvio padrão residual, melhor o modelo em ajustar os dados.

O coeficiente de determinação indica a proporção da variabilidade total na variável dependente que é explicada pelo modelo. Neste caso, aproximadamente 68,77 % da variabilidade na variável dependente é explicada pelas variáveis independentes incluídas no modelo. Em resumo, o modelo parece ter bom ajuste aos dados utilizados, explicando cerca de 68,77 % da variabilidade.

Tabela 29 - Sumário do modelo – Parâmetro de rugosidade Ra - Aço C45 +SR

S	R²	R² (aj)	R² (pred)
1,99367	68,77%	67,23%	61,14%

Fonte: Próprio autor, 2023.

- Parâmetro de rugosidade Rt como variável dependente:

O modelo considerando a rugosidade Rt como dependente teve a estrutura conforme é expressado na Equação 4:

$$\begin{aligned}
 R_t = & 30,81 - (1,67 * V_c \ 180) + (3,57 * V_c \ 278) + (5,24 * V_c \ 300) - (10,05 * f_n \ 0,15) + \\
 & (4,79 * f_n \ 0,23) + (5,26 * f_n \ 0,30) - (5,48 * V_c \ 180_f_n \ 0,15) + (2,10 * V_c \ 180_f_n \\
 & 0,23) + (3,39 * V_c \ 180_f_n \ 0,30) - (1,07 * V_c \ 278_f_n \ 0,15) - \\
 & (8,89 * V_c \ 278_f_n \ 0,23) + (9,96 * V_c \ 278_f_n \ 0,30) + (6,55 * V_c \ 300_f_n \ 0,15) + (6,80 * \\
 & V_c \ 300_f_n \ 0,23) - (13,35 * V_c \ 300_f_n \ 0,30)
 \end{aligned} \quad (4)$$

Na Tabela 30 é apresentado as variáveis estimadas nos modelos, incluindo os coeficientes, valores-T e valores-P associados a cada variável, além dos VIFs.

O valor-P menor que 0,05 indicou que o intercepto é estatisticamente significativo para a variável velocidade de corte 278 m/min, avanço 0,15 mm/rot, avanço 0,23 mm/rot e para as interações Vc 180_fn 0,15 e Vc 278_fn 0,23.

Observa-se que os VIFs, em geral menores que 5, há baixa multicolinearidade entre as variáveis independentes no modelo. No entanto, é importante prestar atenção aos VIFs para as variáveis avanço 0,15 mm/rot e avanço 0,23 mm/rot, por serem os maiores valores.

Tabela 30 - Coeficientes – Parâmetro de rugosidade Rt - Aço C45 +SR

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	30,81	1,05	29,41	0,000	
Velocidade					
180	-1,67	1,27	-1,31	0,190	1,27
278	-3,57	1,27	-2,82	0,005	1,27
Avanço					
0,15	-10,05	1,29	-7,78	0,000	1,75
0,23	4,79	1,46	3,29	0,001	2,02
Velocidade*Avanço					
180 0,15	-5,48	1,64	-3,35	0,001	1,65
180 0,23	2,10	1,77	1,18	0,238	1,62
278 0,15	-1,07	1,64	-0,65	0,516	1,65
278 0,23	-8,89	1,77	-5,02	0,000	1,62

Fonte: Próprio autor, 2023.

Na Tabela 31 é mostrado os indicadores de desempenho do modelo, considerando Rt como variável dependente. O coeficiente de determinação revela que aproximadamente 53 % da variabilidade na variável dependente é explicada pelas variáveis independentes incorporadas no modelo. Em resumo, o modelo parece apresentar um ajuste limitado aos dados utilizados, explicando cerca de 53 % da variabilidade observada.

O R^2 reduzido do modelo pode derivar de diversas fontes, sendo uma delas a inadequação da variável resposta Rt em relação às covariáveis independentes. Pode-se considerar que a relação entre as covariáveis e a resposta demanda uma estrutura mais complexa do que a modelagem linear utilizada neste estudo. Essa possibilidade poderia justificar o ajuste limitado do modelo, destacando a importância de analisar cada caso individualmente para identificar a causa raiz.

Tabela 31 - Sumário do modelo – Parâmetro de rugosidade Rt - Aço C45 +SR

S	R^2	R^2 (aj)	R^2 (pred)
10,5066	53,01%	50,69%	44,28%

Fonte: Próprio autor, 2023.

- Parâmetro de rugosidade Rz como variável dependente:

A estrutura do modelo, tendo a rugosidade Rz como variável dependente, foi delineada conforme é descrito na Equação 5:

$$\begin{aligned}
 Rz = & 26,068 - (3,193 * Vc \ 180) - (2,177 * Vc \ 278) + (5,37 * Vc \ 300) - \\
 & (10,849 * fn \ 0,15) + (4,04 * fn \ 0,23) + (6,81 * fn \ 0,30) - (2,44 * Vc \ 180_fn \ 0,15) - \\
 & (1,28 * Vc \ 180_fn \ 0,23) + (3,72 * Vc \ 180_fn \ 0,30) - (0,89 * Vc \ 278_fn \ 0,15) - \\
 & (7,38 * Vc \ 278_fn \ 0,23) + (8,28 * Vc \ 278_fn \ 0,30) + (3,33 * Vc \ 300_fn \ 0,15) + \\
 & (8,66 * Vc \ 300_fn \ 0,23) - (12,00 * Vc \ 300_fn \ 0,30)
 \end{aligned} \tag{5}$$

Na tabela 32 é mostrado as variáveis estimadas nos modelos, apresentando os coeficientes, valores-T e valores-P associados a cada variável, juntamente com os VIFs.

O valor-P menor que 0,05 indicou que o intercepto é estatisticamente significativo para a variável velocidade de corte 180 m/min e 278 m/min, avanço 0,15 mm/rot e 0,23 mm/rot e para as interações Vc 180_fn 0,15 e Vc 278_fn 0,23.

Observa-se que os VIFs, em geral menores que 5, há baixa multicolinearidade entre as variáveis independentes no modelo. No entanto, é importante prestar atenção aos VIFs para as variáveis avanço 0,15 mm/rot e avanço 0,23 mm/rot, por serem os maiores valores.

Tabela 32 - Coeficientes – Parâmetro de rugosidade Rz - Aço C45 +SR

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	26,068	0,747	34,90	0,000	
Velocidade					
180	-3,193	0,904	-3,53	0,001	1,27
278	-2,177	0,904	-2,41	0,017	1,27
Avanço					
0,15	-10,849	0,920	-11,79	0,000	1,75
0,23	4,04	1,04	3,89	0,000	2,02
Velocidade*Avanço					
180 0,15	-2,44	1,17	-2,09	0,038	1,65
180 0,23	-1,28	1,26	-1,01	0,313	1,62
278 0,15	-0,89	1,17	-0,76	0,446	1,65
278 0,23	-7,38	1,26	-5,84	0,000	1,62

Fonte: Próprio autor, 2023.

Na tabela 33 é apresentado um resumo com os indicadores de desempenho do modelo, considerando Rz como variável dependente. O coeficiente de determinação indica que aproximadamente 67 % da variabilidade na variável dependente é explicada pelas variáveis independentes incluídas no modelo. Em resumo, o modelo parece ter um ajuste moderado aos dados utilizados, explicando cerca de 67 % da variabilidade apenas.

Tabela 33 - Sumário do modelo – Parâmetro de rugosidade Rz - Aço C45 +SR

S	R²	R² (aj)	R² (pred)
7,49003	67,24%	65,62%	59,24%

Fonte: Próprio autor, 2023.

Ao analisar os dados referentes ao aço C45 com tratamento térmico de alívio de tensão, observou-se que o modelo que obteve o melhor ajuste aos dados considera o parâmetro de rugosidade Ra como variável dependente, alcançando um R² de 68,77 %. Em seguida, o parâmetro de rugosidade Rz também apresentou um bom ajuste, atingindo um R² de 67,24 %. No entanto, o parâmetro de rugosidade Rt

mostrou o pior ajuste, com um R^2 de 53,01 %. Além disso, a velocidade 278 m/min não foi significativa para explicar o modelo apenas na modelagem que leva a rugosidade R_a como dependente ou resposta e nos modelos em que a rugosidade R_t e R_z são dependentes ou respostas, em nenhum deles a interação entre a velocidade de corte 180 m/min e avanço 0,23 mm/rot e a velocidade de corte 278 m/min e avanço 0,15 mm/rot foi significativa para explicar o modelo.

5.5.9.2 Análise do modelo de regressão considerando o Aço C45 no estado de fornecimento normalizado (+N)

- Parâmetro de rugosidade R_a como variável dependente:

O modelo que considerou a rugosidade R_a como variável dependente apresentou a estrutura conforme é demonstrado na Equação 6:

$$\begin{aligned} R_a = & 7,090 - (0,115 * Vc \ 180) + (1,989 * Vc \ 278) - (1,873 * Vc \ 300) - (1,321 * fn \ 0,15) \\ & - (1,424 * fn \ 0,23) + (2,745 * fn \ 0,30) - (2,344 * Vc \ 180_fn \ 0,15) + \\ & (0,596 * Vc \ 180_fn \ 0,23) + (1,748 * Vc \ 180_fn \ 0,30) + (1,818 * Vc \ 278_fn \ 0,15) - \\ & (1,479 * Vc \ 278_fn \ 0,23) + (0,339 * Vc \ 278_fn \ 0,30) + (0,526 * Vc \ 300_fn \ 0,15) + (0,8 \\ & 83 * Vc \ 300_fn \ 0,23) - (1,408 * Vc \ 300_fn \ 0,30) \end{aligned} \quad (6)$$

Na Tabela 34, observa-se as variáveis estimadas nos modelos, destacando os coeficientes, valores-T, valores-P e VIFs associados a cada variável.

O valor-P menor que 0,05 indicou que o intercepto é estatisticamente significativo para a variável velocidade de corte 278 m/min, avanço 0,15 mm/rot e 0,23 mm/rot e para as interações $Vc \ 180_fn \ 0,15$, $Vc \ 278_fn \ 0,15$ e $Vc \ 278_fn \ 0,23$.

Observa-se que os VIFs, em geral menores que 5, há baixa multicolinearidade entre as variáveis independentes no modelo. Entretanto, destaca-se a importância de monitorar os VIFs das interações entre as variáveis.

Tabela 34 - Coeficientes – Parâmetro de rugosidade Ra - Aço C45 +N

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	7,090	0,241	29,38	0,000	
Velocidade					
180	-0,115	0,329	-0,35	0,726	1,29
278	1,989	0,329	6,05	0,000	1,29
Avanço					
0,15	-1,321	0,329	-4,02	0,000	1,29
0,23	-1,424	0,329	-4,33	0,000	1,29
Velocidade*Avanço					
180 0,15	-2,344	0,456	-5,14	0,000	1,55
180 0,23	0,596	0,456	1,31	0,194	1,55
278 0,15	1,818	0,456	3,99	0,000	1,55
278 0,23	-1,479	0,456	-3,24	0,002	1,55

Fonte: Próprio autor, 2023.

Na tabela 35, é apresentado um resumo dos indicadores de performance do modelo, considerando o parâmetro de rugosidade Ra como variável dependente. Em resumo, o modelo exibe um ajuste moderado com um R^2 de 58 %. Ao comparar esse desempenho com o modelo construído para o aço com tratamento térmico por alívio de tensão, o modelo atual demonstra um resultado inferior. Além disso, observa-se uma maior dispersão nos resíduos, indicando um ajuste menos preciso também em comparação ao modelo no estado de fornecimento de alívio de tensão.

Tabela 35 - Sumário do modelo – Parâmetro de rugosidade Ra - Aço C45 +N

S	R^2	R^2 (aj)	R^2 (pred)
2,59615	58,38%	55,53%	51,78%

Fonte: Próprio autor, 2023.

- Parâmetro de rugosidade Rt como variável dependente:

O modelo considerando a rugosidade Rt como dependente teve a estrutura conforme é expressado na Equação 7:

$$\begin{aligned}
 R_t = & 37,23 - (1,95 * V_c 180) + (10,88 * V_c 278) - (8,93 * V_c 300) - (3,14 * f_n 0,15) - \\
 & (7,35 * f_n 0,23) + (10,49 * f_n 0,30) - (9,71 * V_c 180_{fn 0,15}) + (3,63 * V_c 180_{fn 0,23}) \\
 & + (6,08 * V_c 180_{fn 0,30}) + (9,06 * V_c 278_{fn 0,15}) - (4,31 * V_c 278_{fn 0,23}) - (4,75 \\
 & * V_c 278_{fn 0,30}) + (0,65 * V_c 300_{fn 0,15}) + (0,69 * V_c 300_{fn 0,23}) - \\
 & (1,33 * V_c 300_{fn 0,30})
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Na Tabela 36 é apresentado as variáveis estimadas nos modelos, incluindo os coeficientes, valores-T, valores-P associados a cada variável, e os VIFs.

O valor-P menor que 0,05 indicou que o intercepto é estatisticamente significativo para a variável velocidade de corte 278 m/min, 0,23 mm/rot e para as interações Vc 180_fn 0,15 e Vc 278_fn 0,15.

Observa-se que os VIFs, em geral menores que 5, há baixa multicolinearidade entre as variáveis independentes no modelo. Entretanto, destaca-se a importância de monitorar os VIFs das interações entre as variáveis.

Tabela 36 - Coeficientes – Parâmetro de rugosidade Rt - Aço C45 +N

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	37,23	1,21	30,88	0,000	
Velocidade					
180	-1,95	1,64	-1,19	0,238	1,29
278	10,88	1,64	6,62	0,000	1,29
Avanço					
0,15	-3,14	1,64	-1,91	0,058	1,29
0,23	-7,35	1,64	-4,47	0,000	1,29
Velocidade*Avanço					
180 0,15	-9,71	2,28	-4,26	0,000	1,55
180 0,23	3,63	2,28	1,59	0,114	1,55
278 0,15	9,06	2,28	3,98	0,000	1,55
278 0,23	-4,31	2,28	-1,89	0,061	1,55

Fonte: Próprio autor, 2023.

Na tabela 37, é apresentado um sumário contendo os indicadores de desempenho do modelo, considerando a variável Rt como dependente. Em resumo,

o modelo exibe um ajuste que varia de moderado a ruim, com R^2 de 51,59 %. Ao ser comparado com o modelo construído para o aço com tratamento térmico por alívio de tensão, o apresentado agora obteve um resultado ligeiramente inferior. Além disso, neste modelo, os resíduos apresentam uma dispersão maior, indicando um ajuste menos preciso em relação ao modelo construído para o aço C45 no estado de fornecimento de alívio de tensão.

Tabela 37 - Sumário do modelo – Parâmetro de rugosidade R_t - Aço C45 +N

S	R^2	R^2 (aj)	R^2 (pred)
12,6991	51,59%	48,28%	44,25%

Fonte: Próprio autor, 2023.

- Parâmetro de rugosidade R_z como variável dependente:

A configuração do modelo, com a rugosidade R_z como variável dependente, é expressado na Equação 8 da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 R_z = & 30,844 - (1,49 * V_c 180) + (9,14 * V_c 278) - (7,65 * V_c 300) - (3,36 * f_n 0,15) - \\
 & (6,45 * f_n 0,23) + (9,91 * f_n 0,30) - (9,61 * V_c 180_f_n 0,15) + (3,46 * V_c 180_f_n 0,23) \\
 & + (6,15 * V_c 180_f_n 0,30) + (8,73 * V_c 278_f_n 0,15) - (5,18 * V_c 278_f_n 0,23) - (3,56 \\
 & * V_c 278_f_n 0,30) + (0,88 * V_c 300_f_n 0,15) + (1,71 * V_c 300_f_n 0,23) - \\
 & (2,60 * V_c 300_f_n 0,30)
 \end{aligned} \tag{8}$$

Na Tabela 38 é apresentado as variáveis estimadas nos modelos, incluindo os coeficientes, valores-T, valores-P associados a cada variável, e os VIFs.

Apenas a variável velocidade de corte 180 m/min não se mostra estatisticamente significativa para a explicação da rugosidade R_z . Entre as variáveis restantes, a interação mais influente é aquela entre a velocidade de corte 180 m/min e o avanço 0,15 mm/rot, onde um aumento de uma unidade na variável resulta em uma redução de 9,61 na rugosidade R_z . Adicionalmente, a interação entre a velocidade de corte 278 m/min e o avanço 0,23 mm/rot também apresenta relevância estatística, provocando uma redução de 5,18 na rugosidade R_z com o aumento de uma unidade na variável.

Observa-se que os VIFs, em geral menores que 5, há baixa multicolinearidade entre as variáveis independentes no modelo. Entretanto, destaca-se a importância de monitorar os VIFs das interações entre as variáveis.

Tabela 38 - Coeficientes – Parâmetro de rugosidade Rz - Aço C45 +N

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	30,844	0,915	33,73	0,000	
Velocidade					
180	-1,49	1,25	-1,20	0,233	1,29
278	9,14	1,25	7,33	0,000	1,29
Avanço					
0,15	-3,46	1,25	-2,77	0,006	1,29
0,23	-6,45	1,25	-5,17	0,000	1,29
Velocidade*Avanço					
180 0,15	-9,61	1,73	-5,56	0,000	1,55
180 0,23	3,46	1,73	2,00	0,047	1,55
278 0,15	8,73	1,73	5,05	0,000	1,55
278 0,23	-5,18	1,73	-3,00	0,003	1,55

Fonte: Próprio autor, 2023.

Na tabela 39 é ilustrado o resumo contendo os indicadores de desempenho do modelo, tendo a Rugosidade Rz como variável dependente.

O coeficiente de determinação revela que aproximadamente 61 % da variabilidade na variável dependente é explicada pelas variáveis independentes incorporadas no modelo. Este resultado, embora representativo, mostra-se inferior ao modelo anterior construído para o aço com tratamento térmico por alívio de tensão, que apresentou um R^2 de aproximadamente 67 %. Adicionalmente, neste modelo, os resíduos exibem uma maior dispersão, indicando um ajuste menos eficiente em comparação ao apresentado anteriormente.

Em geral, observa-se que os dados relacionados ao aço C45 no estado de fornecimento com alívio de tensão demonstraram ter os melhores ajustes, indicados pelo coeficiente de determinação (R^2), em relação aos parâmetros de rugosidade Ra, Rt e Rz, quando comparados com o C45 no estado de fornecimento normalizado.

Tabela 39 - Sumário do modelo – Parâmetro de rugosidade Rz - Aço C45 +N

S	R²	R² (aj)	R² (pred)
9,83775	60,50%	57,80%	54,41%

Fonte: Próprio autor, 2023.

De maneira geral, os dados relacionados ao aço C45 no estado de fornecimento com alívio de tensão demonstraram ter os melhores ajustes, indicados pelo coeficiente de determinação (R^2), em relação aos parâmetros de rugosidade Ra, Rt e Rz, quando comparados com o C45 no estado de fornecimento normalizado.

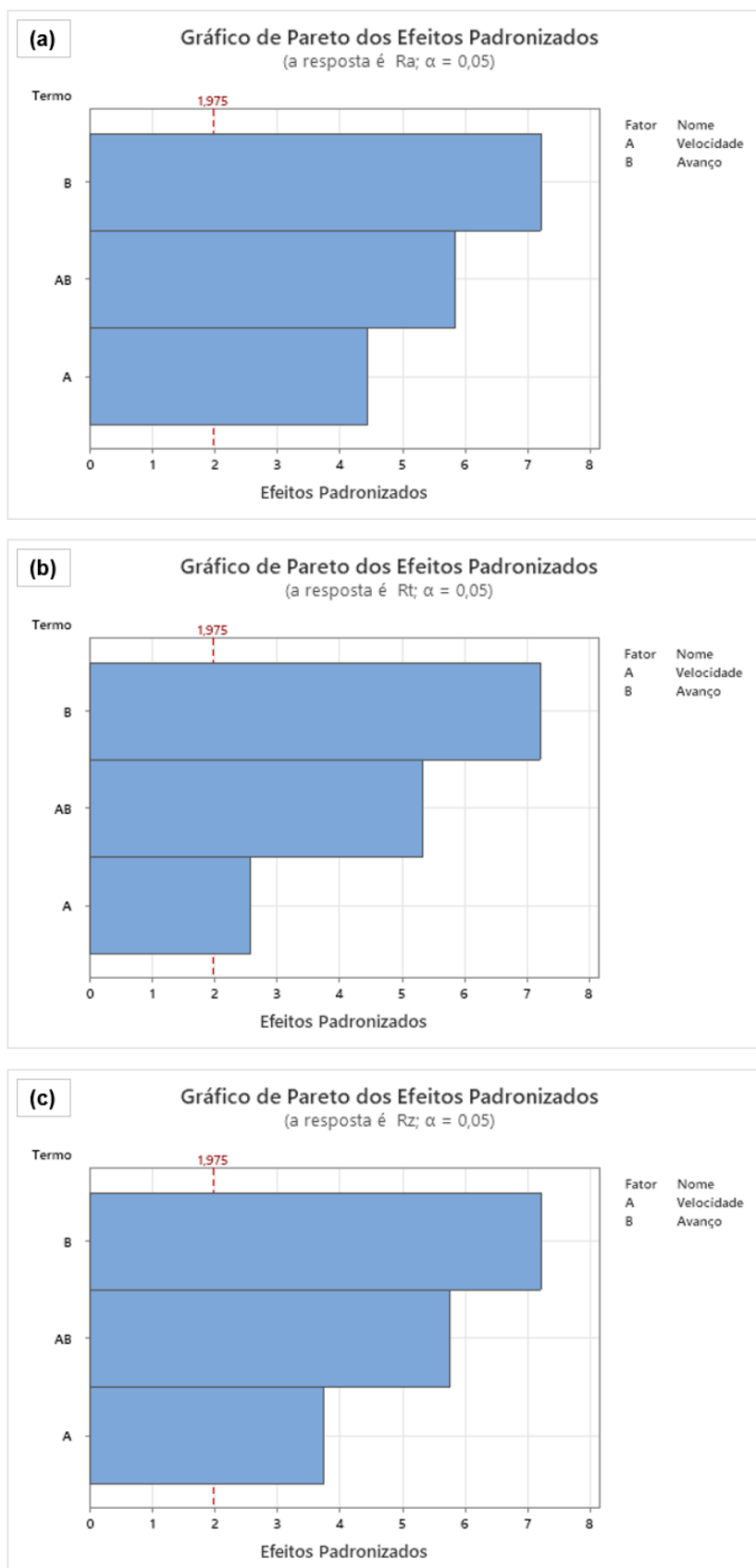
5.5.10 Análise dos gráficos da ANOVA para os experimentos realizados com o aço C45 no estado de fornecimento de alívio de tensão (+SR)

5.5.10.1 Análise dos gráficos de Pareto

Na Figura 42 é ilustrado os gráficos de Pareto da ANOVA, oferecendo uma representação visual das estimativas dos efeitos individuais das variáveis independentes nas variáveis dependentes (BREITKREITZ et al., 2014; ANNIGERI et al., 2016). A linha vertical vermelha na figura representa o índice estatístico "t", calculado e associado ao p-valor de referência, estabelecendo o limite mínimo de significância (BREITKREITZ et al., 2014; ANNIGERI et al., 2016), neste caso, mantido constante em 1,975 para todos os parâmetros de rugosidade.

Na Figura 42 (a), (b) e (c), observa-se que todas as três variáveis independentes exibiram efeitos absolutos significantes em todas as variáveis dependentes, ultrapassando o limite mínimo de significância estabelecido em 1,975. Ao avaliar o impacto das observações no modelo, a variável avanço destacou-se como a mais influente em todas as variáveis dependentes, Ra, Rt e Rz, seguida pela interação entre velocidade de corte e avanço, e, por último, pela velocidade de corte. Este comportamento corrobora com o que é descrito na literatura Diniz et. al. 2014 e Machado et. al. 2015, segundo os quais, geralmente o avanço é a variável independente que mais influência na rugosidade superficial das peças torneadas.

Figura 42 - Gráficos de Pareto dos efeitos padronizados dos parâmetros de Rugosidade Ra, Rt e Rz
– C45 +SR

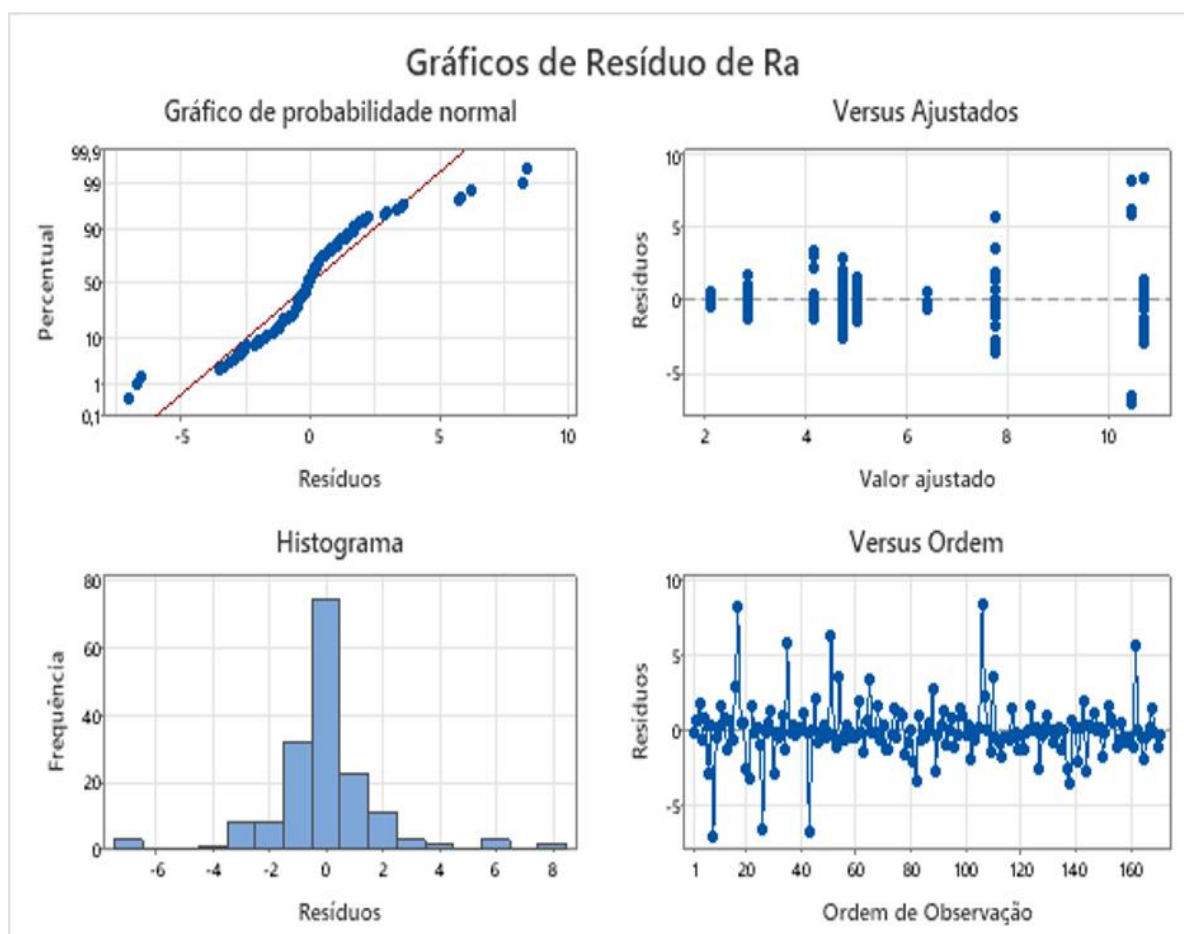


Fonte: Próprio autor, 2023.

5.5.10.2 Análise dos gráficos de resíduos

Ao examinar o gráfico de resíduos para o parâmetro de rugosidade R_a , conforme é ilustrado na Figura 43, observa-se que os resíduos se aproximam de uma distribuição normal, indicado pela proximidade dos pontos à reta no gráfico de probabilidade normal. Além disso, ao analisar o gráfico de resíduos em relação aos valores ajustados, nota-se que o modelo apresenta um ajuste ligeiramente comprometido, sugerindo a presença de heterocedasticidade, conforme Maia (2017) que é a variação não constante dos resíduos dos dados, ou a possibilidade de a premissa de linearidade no modelo não ser plenamente atendida. Ao examinar o histograma dos resíduos, observa-se que eles tendem à normalidade, indicando uma distribuição simétrica.

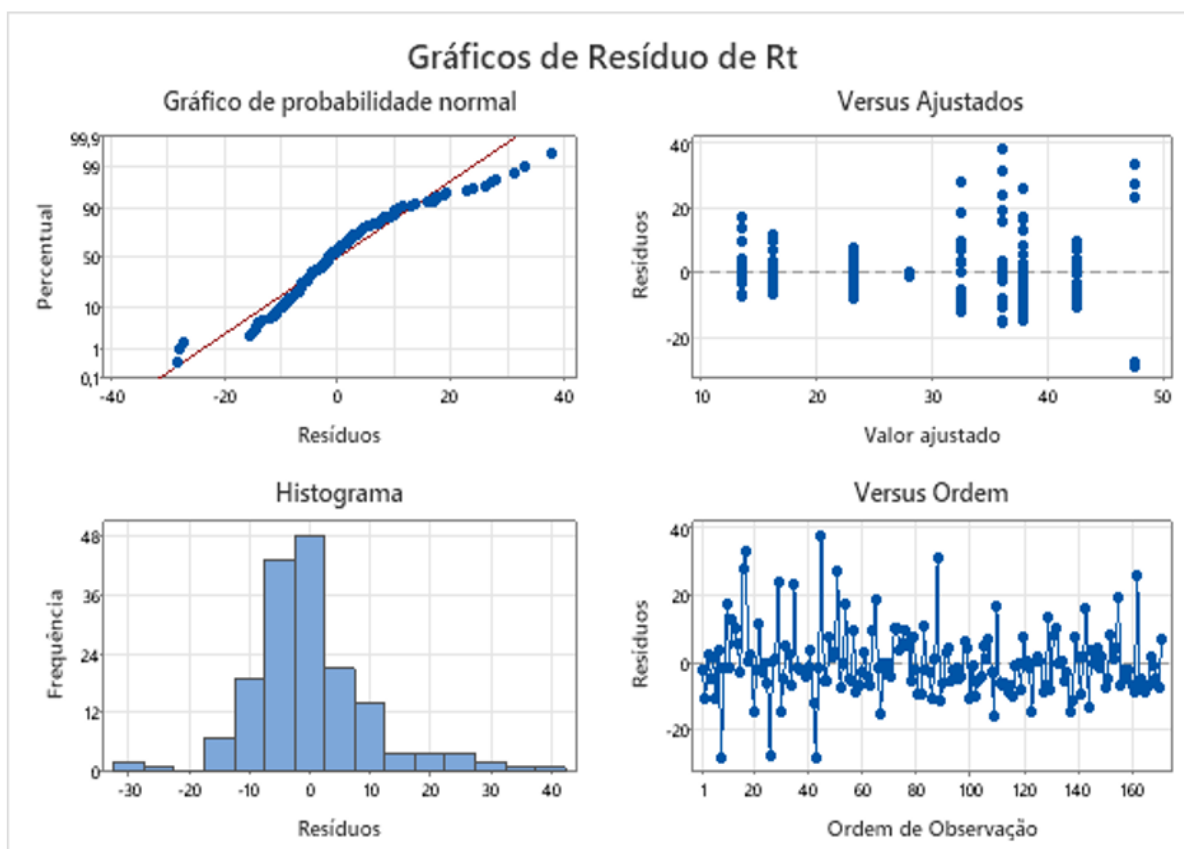
Figura 43 - Gráficos de resíduos do parâmetro de Rugosidade R_a – C45 +SR



Fonte: Próprio autor, 2023.

Ao examinar a Figura 44, que apresenta os gráficos de resíduos para o parâmetro de rugosidade R_t , nota-se uma tendência semelhante à observada em R_a . No entanto, ao analisar o gráfico de resíduos pela ordem das observações, destaca-se uma discrepância mais pronunciada nas informações, com mais observações se distanciando do eixo zero. Essa discrepância indica um ajuste ainda mais prejudicado pela variabilidade dos dados em comparação ao parâmetro R_a .

Figura 44 - Gráficos de resíduos do parâmetro de Rugosidade R_t – C45 +SR

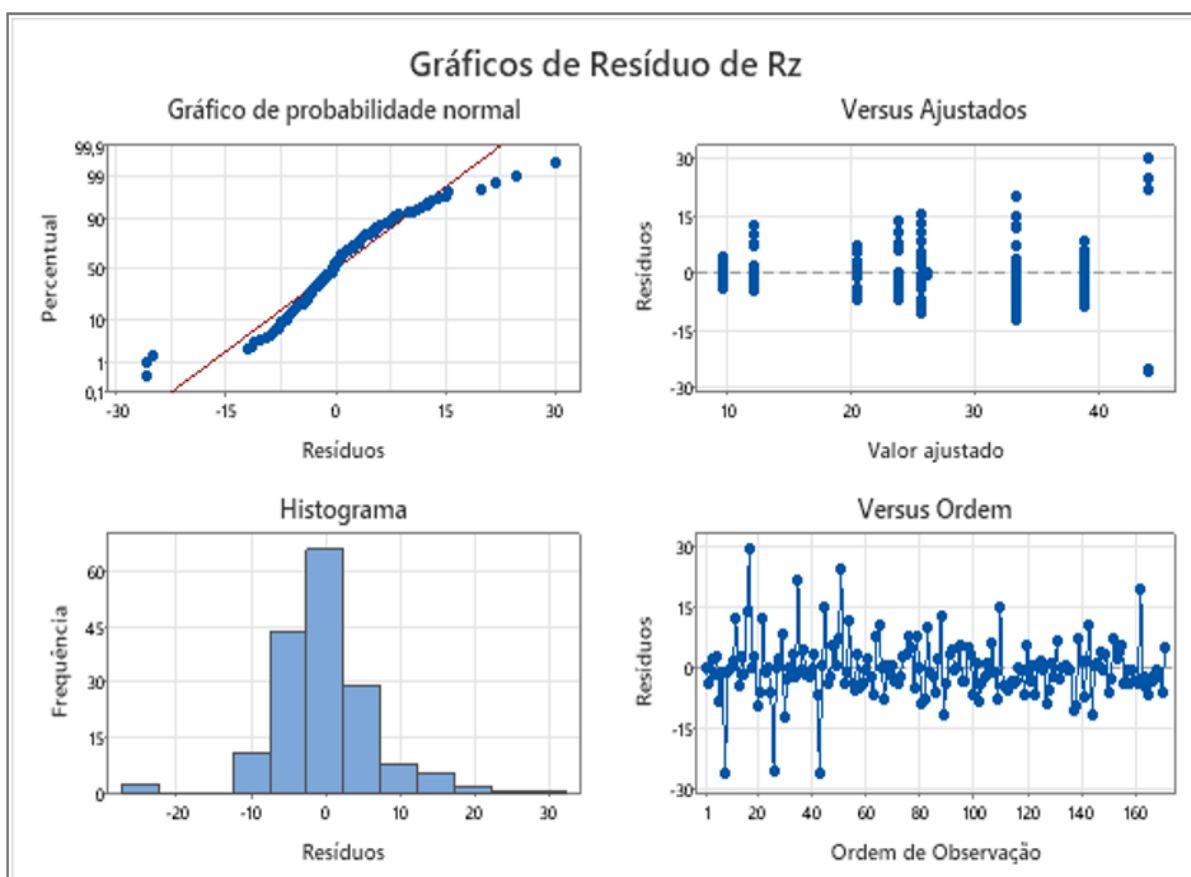


Fonte: Próprio autor, 2023.

Na Figura 45 é apresentado os gráficos de resíduos para o parâmetro de rugosidade R_z . Observa-se que os resíduos estão próximos de uma distribuição normal, conforme indicado pela proximidade dos pontos à reta no gráfico da probabilidade normal. Entretanto, ao analisar o gráfico dos resíduos versus os valores ajustados, percebe-se que o modelo apresenta um ajuste prejudicado, possivelmente devido à presença de heterocedasticidade nos dados (variância dos resíduos não constante) ou à não satisfação da premissa de linearidade no modelo.

O histograma dos resíduos revela uma aproximação dos resíduos à normalidade, evidenciando dados próximos à simetria. Além disso, o gráfico de Resíduos Versus Ordem sugere que, conforme a ordem das observações aumenta, os resíduos tendem a se aproximar de zero, indicando uma redução no erro do modelo. Essa descrição da tendência nos resíduos versus ordem sugere uma melhoria gradual na precisão do modelo com o aumento da ordem das observações.

Figura 45 - Gráficos de resíduos do parâmetro de Rugosidade Rz – C45 +SR



Fonte: Próprio autor, 2023.

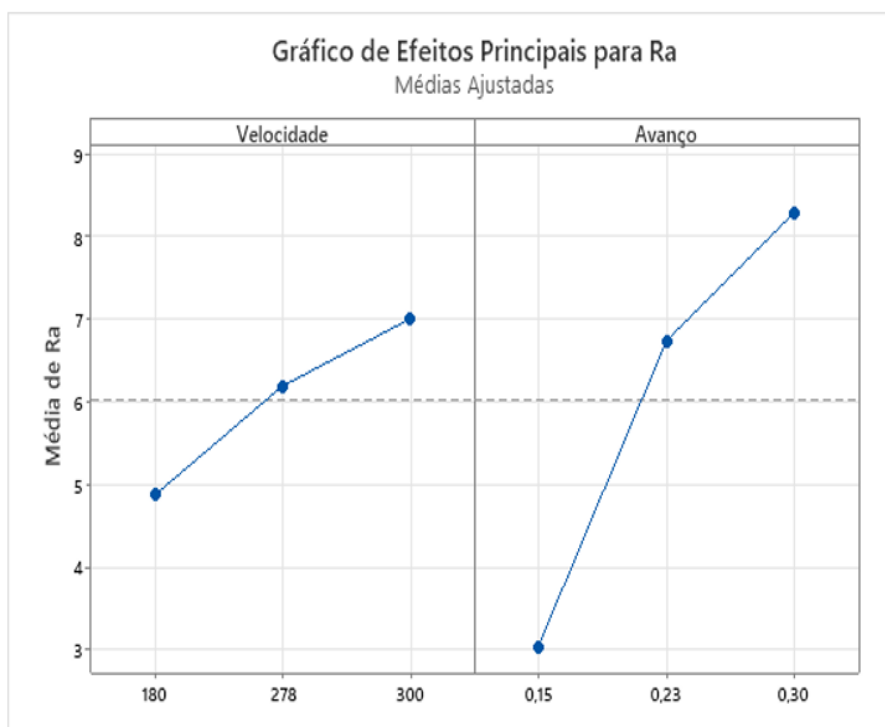
5.5.10.3 Análise dos gráficos fatoriais

Os gráficos fatoriais, que compreendem os gráficos de efeitos principais e os gráficos de interação, representam importantes ferramentas na visualização e interpretação dos resultados de experimentos fatoriais. Os gráficos de efeitos principais desempenham um papel fundamental ao ilustrar o impacto individual de cada variável independente (fator) sobre o resultado. Já o gráfico de interações é uma

ferramenta importante para visualizar como dois ou mais fatores interagem e qual é o impacto dessa interação na resposta do experimento.

Na Figura 46 é apresentado o gráfico de efeitos principais para o parâmetro de rugosidade Ra. Observa-se que, no caso do avanço, a transição de 0,15 mm/rot para 0,23 mm/rot gera uma alteração significativa nas análises, ao passo que o efeito da velocidade de corte cresce de maneira semelhante entre os três fatores.

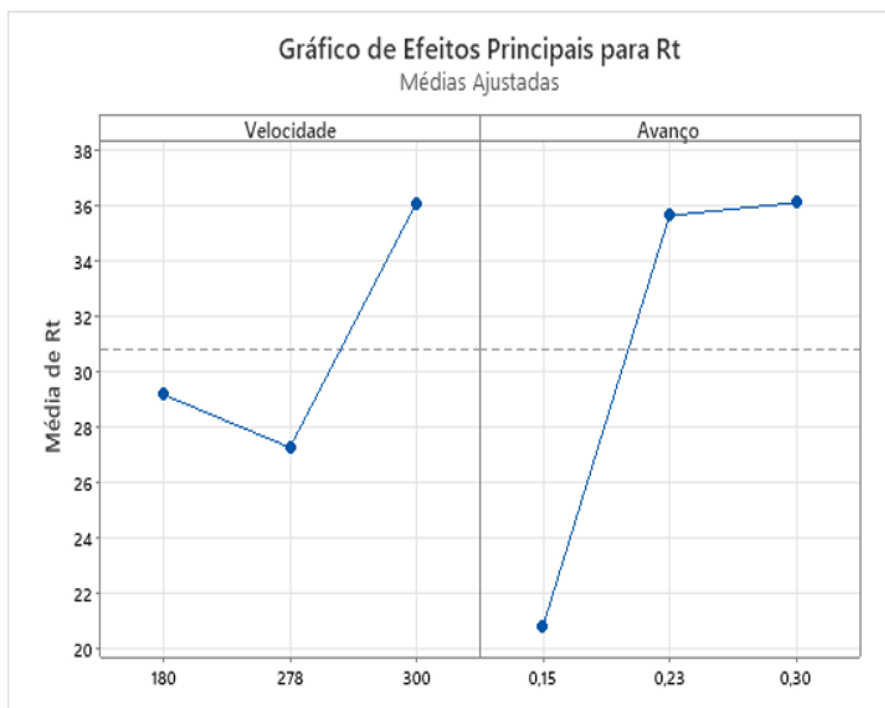
Figura 46 - Gráficos de efeitos principais do parâmetro de Rugosidade Ra – C45 +SR



Fonte: Próprio autor, 2023.

Para o parâmetro de rugosidade Rt, na Figura 47, observa-se um efeito distinto no comportamento da rugosidade com a velocidade de corte em comparação ao parâmetro Ra. É evidenciada uma inflexão na variável velocidade de corte, indicando uma diminuição na rugosidade ao passar de 180 m/min para 278 m/min e um aumento ao passar de 278 m/min para 300 m/min. Entretanto, em relação ao avanço, observa-se o mesmo padrão identificado em Ra, em que a transição de 0,15 mm/rot para 0,23 mm/rot resulta em uma mudança significativa em Rt.

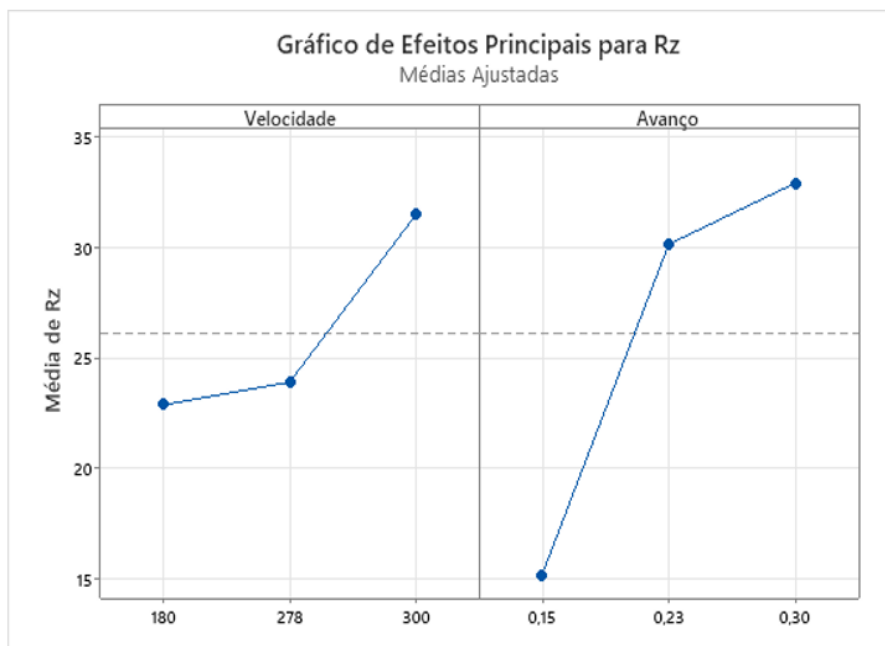
Figura 47 - Gráficos de efeitos principais do parâmetro de Rugosidade Rt – C45 +SR



Fonte: Próprio autor, 2023.

Na Figura 48 é representado os efeitos principais para a variável dependente de rugosidade Rz. Nota-se que a transição da velocidade de corte de 278 m/min para 300 m/min causa um impacto mais significativo do que a mudança de 180 m/min para 278 m/min. Quanto ao avanço, a alteração de 0,15 mm/rot para 0,23 mm/rot resulta em um efeito extremamente pronunciado na variável resposta, ao contrário da mudança de 0,23 mm/rot para 0,30 mm/rot. De maneira geral, o comportamento do avanço segue um padrão bastante similar ao observado nos gráficos de efeitos dos parâmetros Ra e Rt.

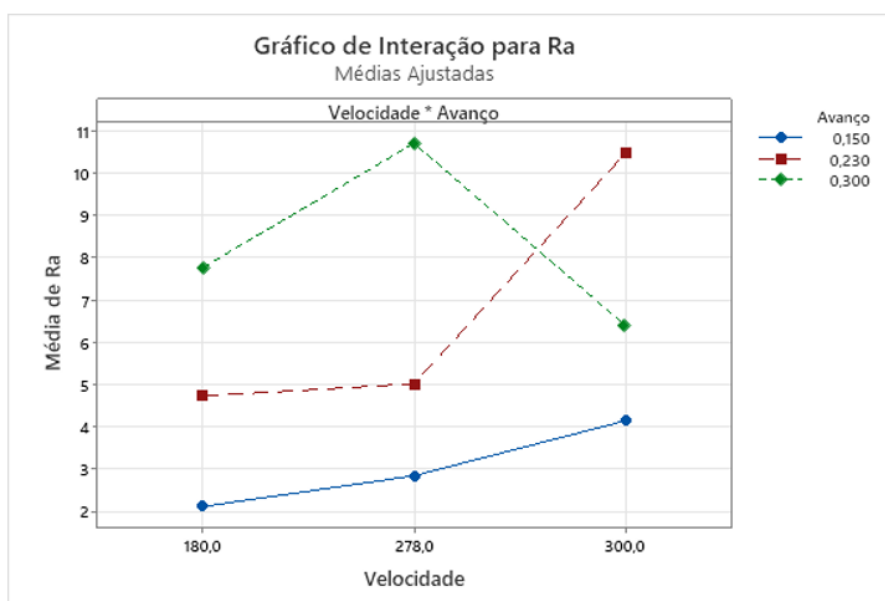
Figura 48 - Gráficos de efeitos principais do parâmetro de Rugosidade Rz – C45 +SR



Fonte: Próprio autor, 2023.

Na Figura 49, apresenta-se o gráfico de interação para o parâmetro de rugosidade Ra, destacando uma interação significativa apenas entre os avanços de 0,23 mm/rot e 0,30 mm/rot, evidenciada pelo cruzamento das linhas correspondentes a esses dois valores de avanço.

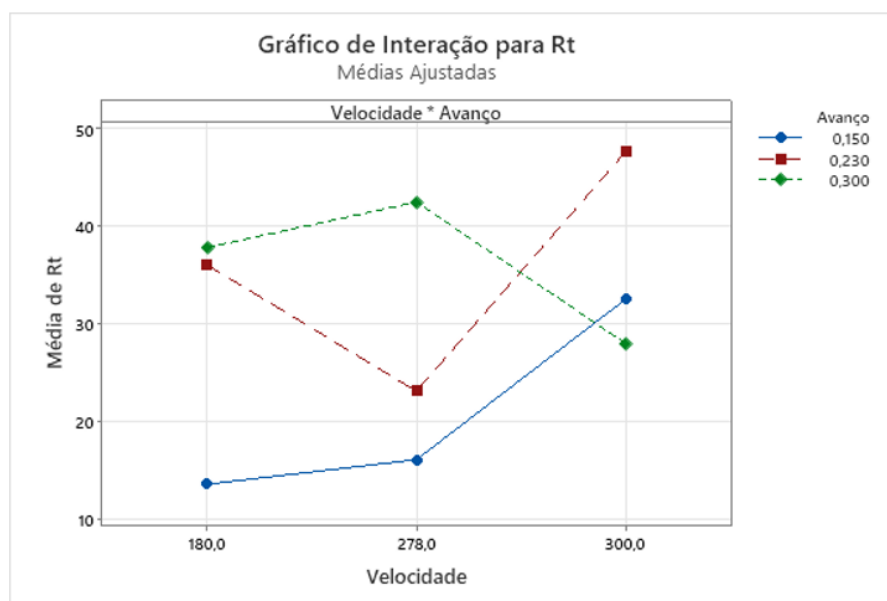
Figura 49 - Gráfico de interação do parâmetro de Rugosidade Ra – C45 +SR



Fonte: Próprio autor, 2023.

Na Figura 50, é ilustrado a interação para o parâmetro de rugosidade R_t , destaca-se uma interação significativa entre os três avanços, revelando uma forte correlação entre esses fatores, conforme evidenciado pelo cruzamento das linhas associadas a esses três valores de avanço.

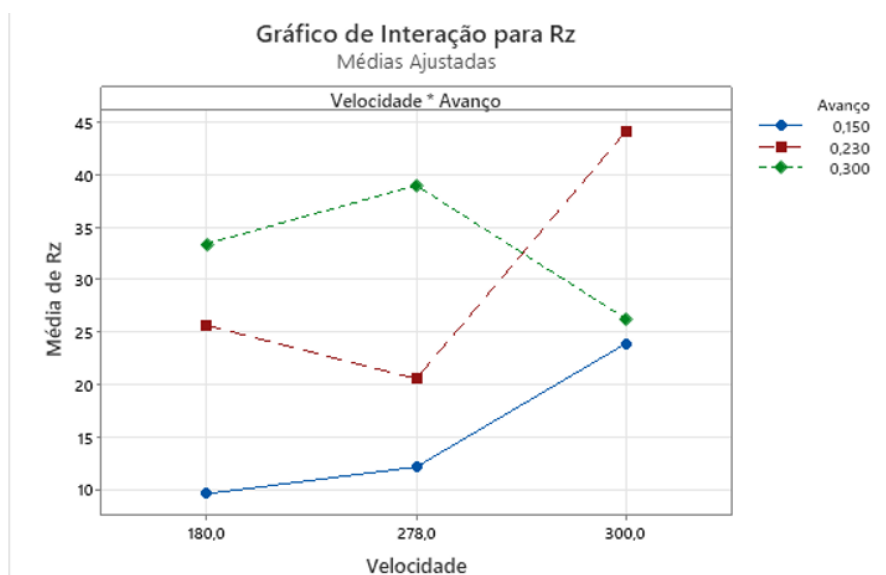
Figura 50 - Gráfico de interação do parâmetro de Rugosidade R_t – C45 +SR



Fonte: Próprio autor, 2023.

Na Figura 51, é mostrado a interação para o parâmetro de rugosidade R_z , destaca-se uma interação significativa entre os avanços de 0,23 mm/rot e 0,30 mm/rot, evidenciada pelo cruzamento das linhas correspondentes a esses valores de avanço. Esse resultado indica uma transição marcante no efeito, comparado ao gráfico anterior, ao passar do avanço de 0,15 mm/rot para 0,23 mm/rot. Além disso, a análise gráfica ressalta como a influência da velocidade de corte na resposta varia em diferentes níveis de avanço. Notavelmente, ao aumentar a velocidade de corte de 278 m/min para 300 m/min, em um avanço de 0,23 mm/rot, observa-se uma alteração média de 25 unidades na rugosidade R_z , representando um efeito bastante expressivo.

Figura 51 - Gráfico de interação do parâmetro de Rugosidade Rz – C45 +SR



Fonte: Próprio autor, 2023.

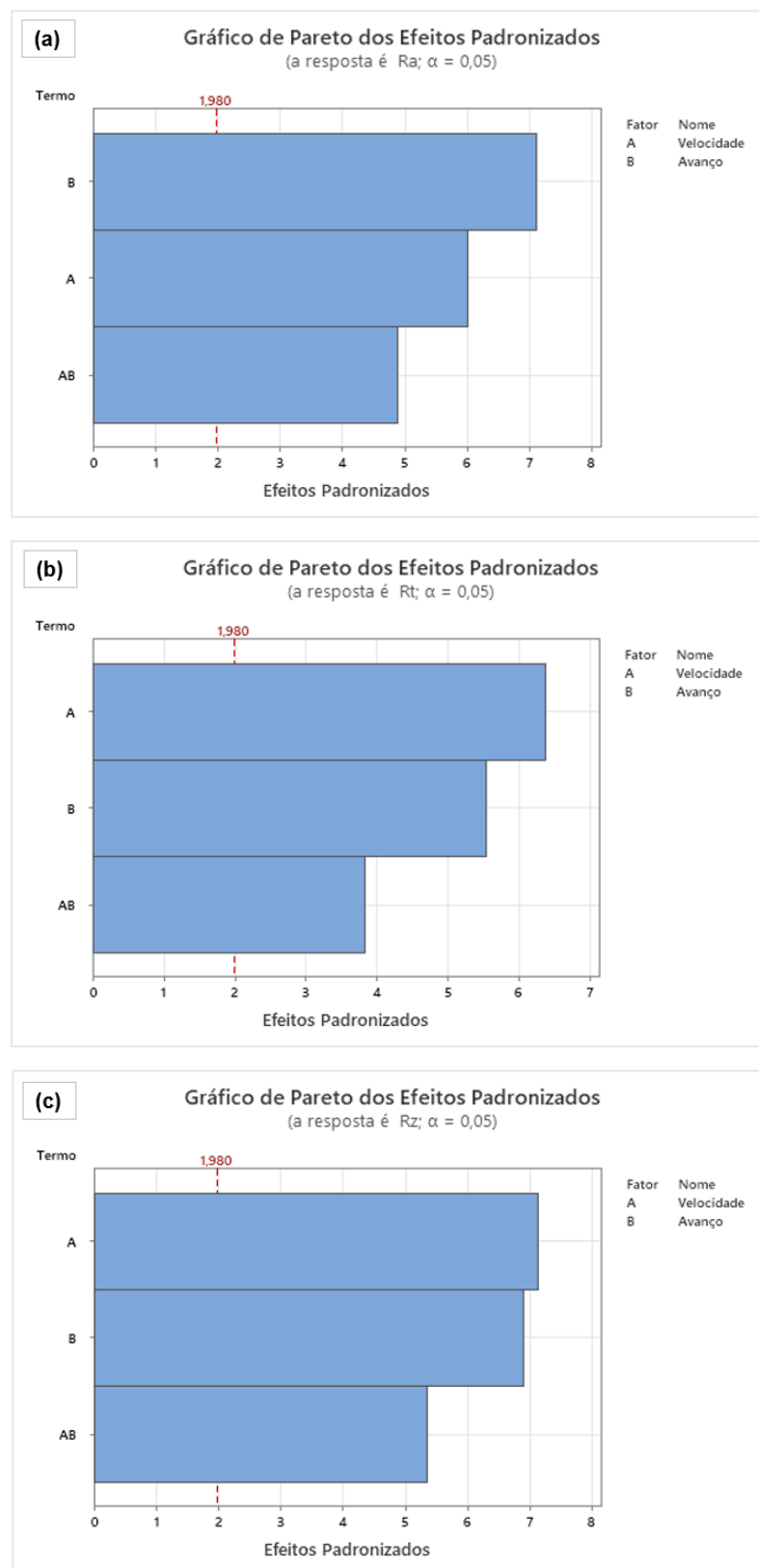
5.5.11 Análise dos gráficos da ANOVA para os experimentos realizados com o aço C45 no estado de fornecimento normalizado (+N)

5.5.11.1 Análise dos gráficos de Pareto

Na Figura 52 (a), (b) e (c), é apresentado os gráficos de Pareto da ANOVA, proporcionando uma representação visual das estimativas dos efeitos individuais das variáveis independentes nas diferentes rugosidades. Observa-se que todas as variáveis exercem um impacto significativo no modelo para todos os parâmetros de rugosidade, contribuindo de maneira expressiva para a variação na variável dependente, uma vez que nenhuma delas está abaixo do limite mínimo de significância estabelecido em 1,980.

No parâmetro de rugosidade Ra, destaca-se que a variável avanço exerceu o maior impacto significativo na variação da variável dependente, seguida pela velocidade de corte e, por fim, pela interação entre velocidade de corte e avanço. No parâmetro Rt, a variável velocidade de corte apresentou como a principal contribuinte significativa para a variação na variável dependente, seguida pelo avanço e, por fim, pela interação entre velocidade de corte e avanço. No caso do parâmetro de rugosidade Rz, o comportamento foi semelhante ao de Rt, com a ressalva de que o valor absoluto da variável avanço ficou muito próximo ao da variável velocidade de corte.

Figura 52 - Gráficos de Pareto dos efeitos padronizados dos parâmetros de Rugosidade Ra, Rt e Rz
– C45 +N



Fonte: Próprio autor, 2023.

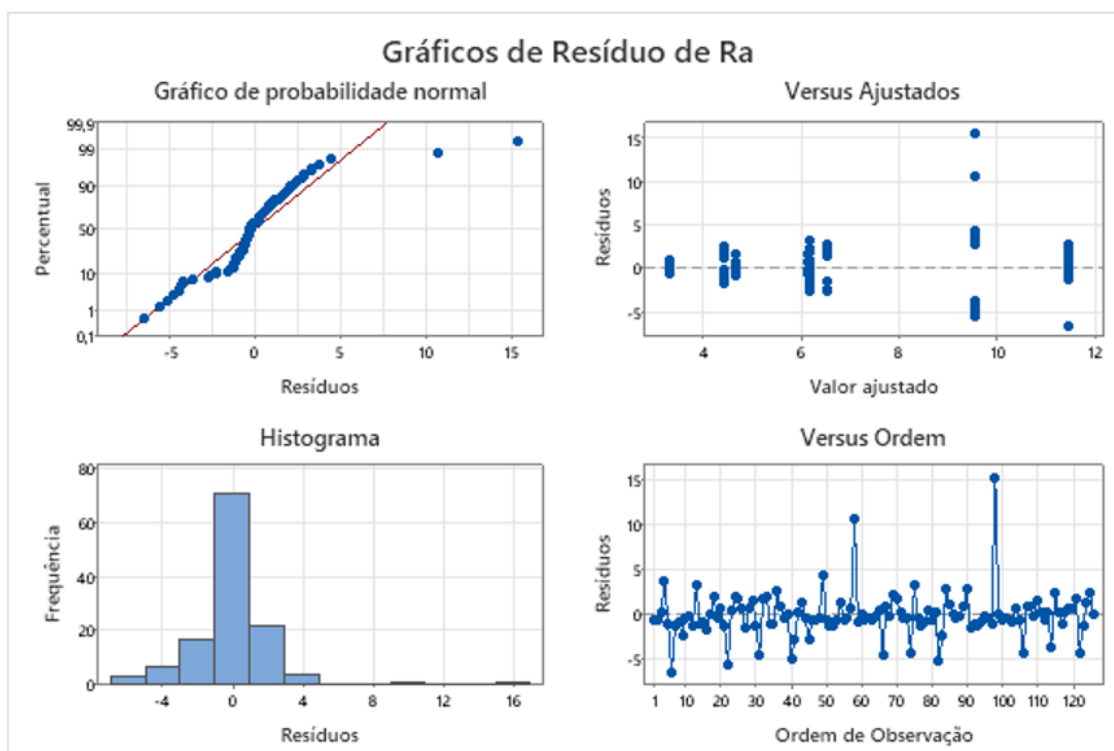
Nota-se uma diferença marcante nos resultados dos efeitos padronizados entre os estados de fornecimento normalizado (+N) e alívio de tensão (+SR). No estado +SR, a variável avanço predominou em todos os parâmetros de rugosidade, seguida pela interação velocidade de corte e avanço. Já no estado +N, a velocidade de corte mostrou predominância, seguida pelo avanço nos parâmetros de rugosidade R_t e R_z . No caso do parâmetro R_a , a predominância foi do avanço, seguido pela velocidade de corte, enquanto a interação velocidade de corte e avanço exerceu o menor impacto nos três parâmetros de rugosidade no estado +N.

5.5.11.2 Análise dos gráficos de resíduos

Ao analisar os gráficos de resíduos para os parâmetros de rugosidade R_a e R_t , conforme é retratado nas Figuras 53 e 54, percebe-se que os resíduos apresentam uma distribuição próxima à normalidade, indicada pela proximidade dos pontos à reta no gráfico da probabilidade normal. Além disso, nos gráficos de resíduos versus valores ajustados, nota-se que o modelo apresenta um ajuste levemente prejudicado, possivelmente devido à presença de heterocedasticidade (variância dos resíduos não constante) nos dados ou ao não atendimento da premissa de linearidade no modelo, uma condição também observada no estado de fornecimento com alívio de tensão (+SR).

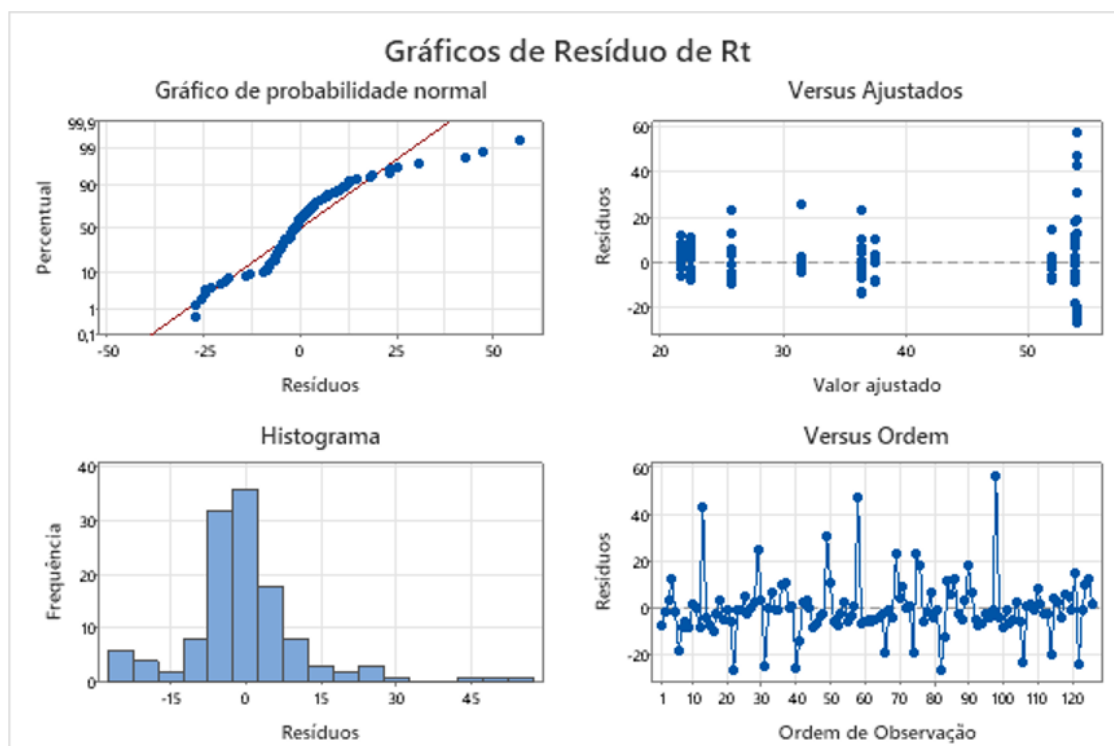
Verifica-se que os gráficos do histograma dos resíduos se aproximam da normalidade, evidenciando uma distribuição próxima à simetria, ainda que deslocada para a esquerda. Tanto para R_a quanto para R_t , é observado um padrão semelhante ao avaliar o gráfico dos resíduos pela ordem das observações, identificando uma discrepância significativa nas informações e um afastamento das observações do eixo zero. Esse padrão indica um ajuste comprometido pela variabilidade dos dados.

Figura 53 - Gráficos de resíduos do parâmetro de Rugosidade Ra – C45 +N



Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 54 - Gráficos de resíduos do parâmetro de Rugosidade Rt – C45 +N

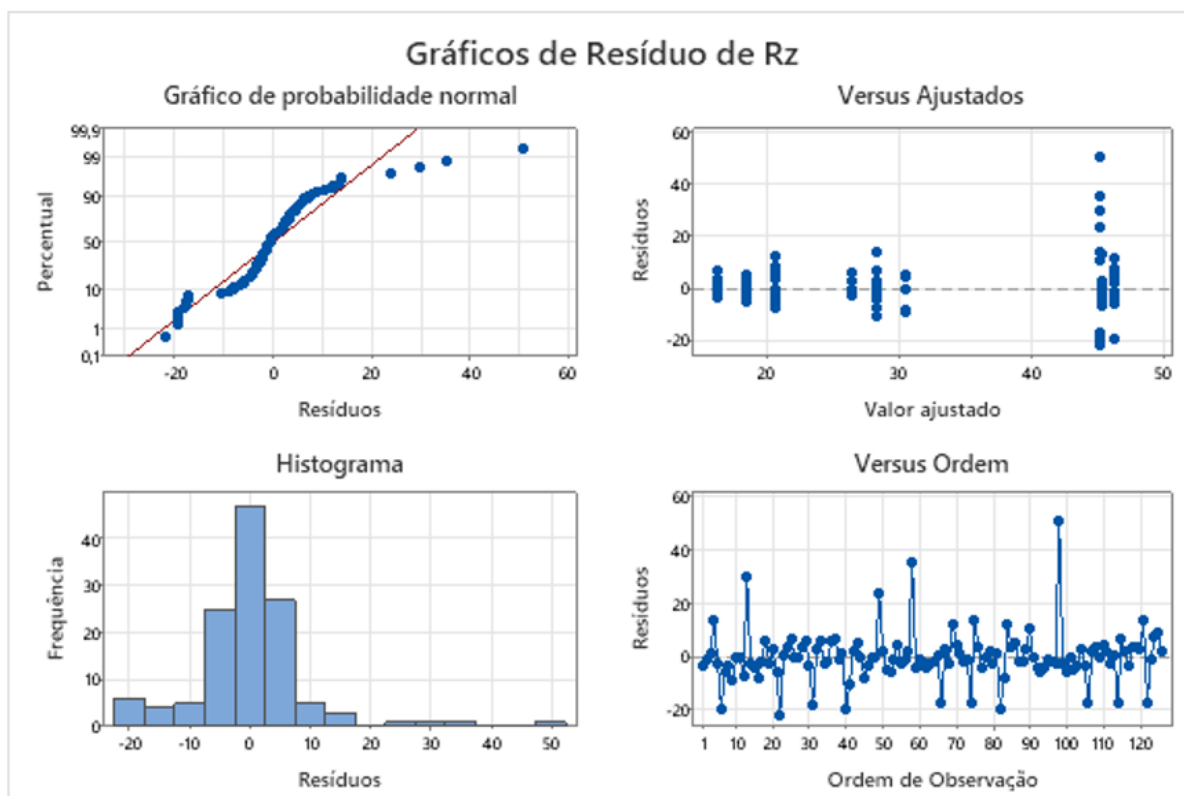


Fonte: Próprio autor, 2023.

Na Figura 55 é mostrado os gráficos de resíduos para o parâmetro de rugosidade R_z . Observa-se que os resíduos mantêm proximidade com uma distribuição normal, evidenciada pela proximidade dos pontos à reta. No entanto, é importante notar a presença de pontos discrepantes na série de dados, conhecidos como outliers, os quais se distanciam significativamente da média das observações. Esses outliers necessitam de investigação para compreender sua origem e aplicar as devidas correções.

Ao analisar o gráfico dos resíduos em relação aos valores ajustados, constata-se que o modelo apresenta um ajuste prejudicado, possivelmente devido à presença de heterocedasticidade (variância dos resíduos não constante) nos dados ou ao não atendimento da premissa de linearidade no modelo. O histograma dos resíduos sugere uma proximidade com a normalidade, com uma leve assimetria à esquerda, que, visualmente, parece ter um impacto mínimo na distribuição da informação. Por fim, ao analisar o gráfico Resíduos Versus Ordem, observa-se um aumento ordenado dos dados, embora ainda mantenham certa aleatoriedade.

Figura 55 - Gráficos de resíduos do parâmetro de Rugosidade R_z – C45 +N

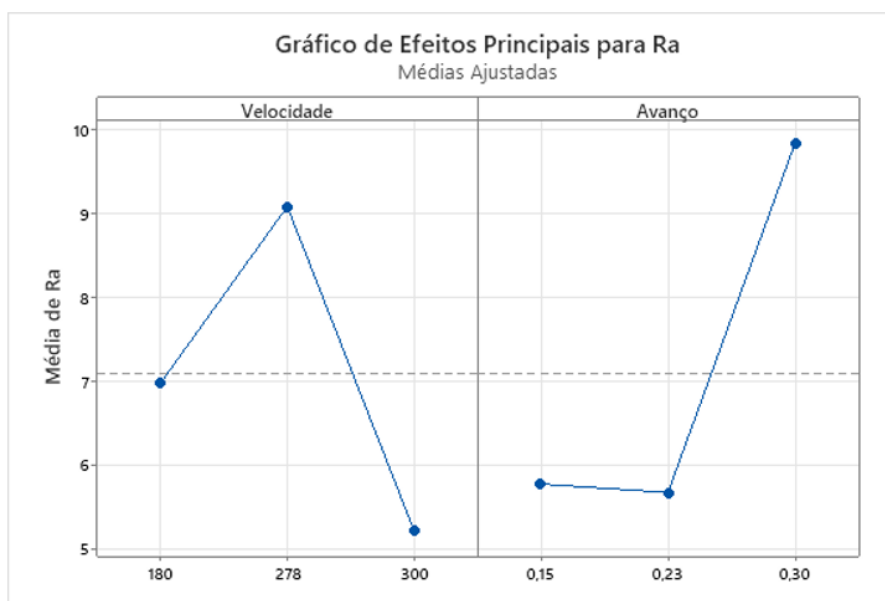


Fonte: Próprio autor, 2023.

5.5.11.3 Análise dos gráficos fatoriais

Na Figura 56 é apresentado o gráfico de efeitos principais para o parâmetro de rugosidade Ra. Nota-se uma redução na rugosidade ao passar do avanço de 0,15 mm/rot para 0,23 mm/rot, enquanto a transição do avanço de 0,25 mm/rot para 0,30 mm/rot provoca um impacto significativo no aumento da rugosidade. Em relação à velocidade de corte, é evidente um aumento expressivo na rugosidade ao alterar a velocidade de corte de 180 m/min para 278 m/min, seguido por uma queda significativa quando a velocidade de corte passa de 278 m/min para 300 m/min. Os comportamentos observados no estado +N diferem daqueles constatados no estado +SR, o qual apresentou gráficos mais lineares.

Figura 56 - Gráficos de efeitos principais do parâmetro de Rugosidade Ra – C45 +N

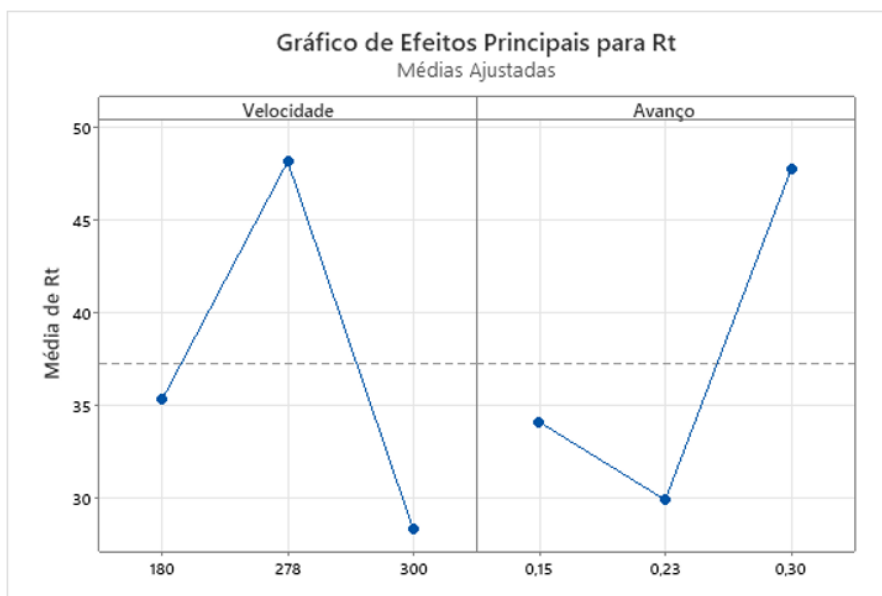


Fonte: Próprio autor, 2023.

Para o parâmetro de rugosidade Rt, conforme é representado na Figura 57, observa-se um comportamento inverso da rugosidade tanto em relação à velocidade de corte quanto ao avanço, quando comparado aos gráficos de efeitos do parâmetro Rt do estado de fornecimento +SR. Verifica-se um aumento de Rt quando a velocidade de corte é alterada de 180 m/min para 278 m/min, seguido por uma queda acentuada da rugosidade quando a velocidade de corte é incrementada de 278 m/min para 300 m/min. No que diz respeito ao avanço, nota-se uma redução da rugosidade ao alterar o avanço de 0,15 mm/rot para 0,23 mm/rot, seguida por um aumento

considerável da rugosidade quando o avanço é modificado de 0,23 mm/rot para 0,30 mm/rot.

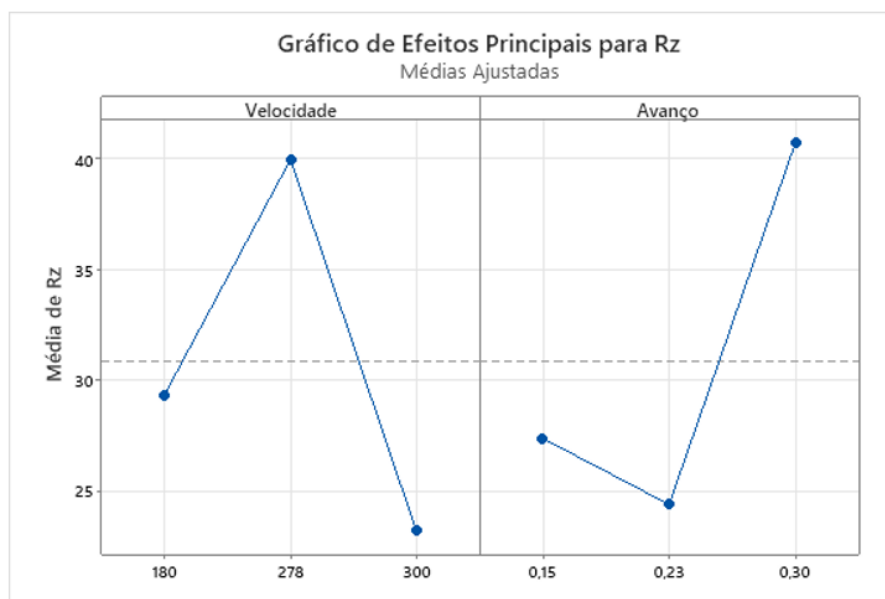
Figura 57 - Gráficos de efeitos principais do parâmetro de Rugosidade Rt – C45 +N



Fonte: Próprio autor, 2023.

Na Figura 58 é ilustrado os efeitos principais para a variável dependente de rugosidade Rz. Observa-se um padrão inverso de comportamento da rugosidade, tanto em relação à velocidade de corte quanto ao avanço, quando comparado aos gráficos de efeitos do parâmetro Rz do estado de fornecimento +SR, e um comportamento semelhante ao gráfico de efeitos principais da rugosidade Rt para o estado +N. Verifica-se um aumento de Rz quando a velocidade de corte é alterada de 180 m/min para 278 m/min, seguido por uma queda acentuada da rugosidade quando a velocidade de corte é incrementada de 278 m/min para 300 m/min. Em relação ao avanço, nota-se uma redução da rugosidade ao alterar o avanço de 0,15 mm/rot para 0,23 mm/rot, seguida por um aumento considerável da rugosidade quando o avanço é modificado de 0,23 mm/rot para 0,30 mm/rot.

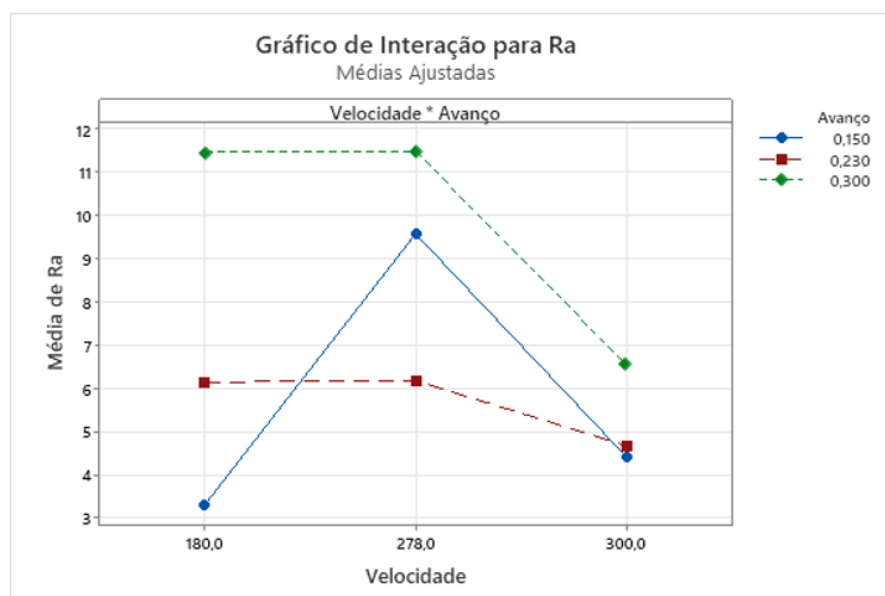
Figura 58 - Gráficos de efeitos principais do parâmetro de Rugosidade Rz – C45 +N



Fonte: Próprio autor, 2023.

Na Figura 59, é apresentado o gráfico de interação para o parâmetro de rugosidade Ra, nota-se uma interação significativa apenas entre os avanços de 0,15 mm/rot e 0,23 mm/rot. Isso é claramente observado pelo cruzamento das linhas correspondentes a esses dois valores de avanço. Essa dinâmica contrasta com o gráfico de interação da rugosidade Ra para o estado de fornecimento +SR, o qual revelou uma interação significativa nos avanços de 0,23 mm/rot e 0,30 mm/rot.

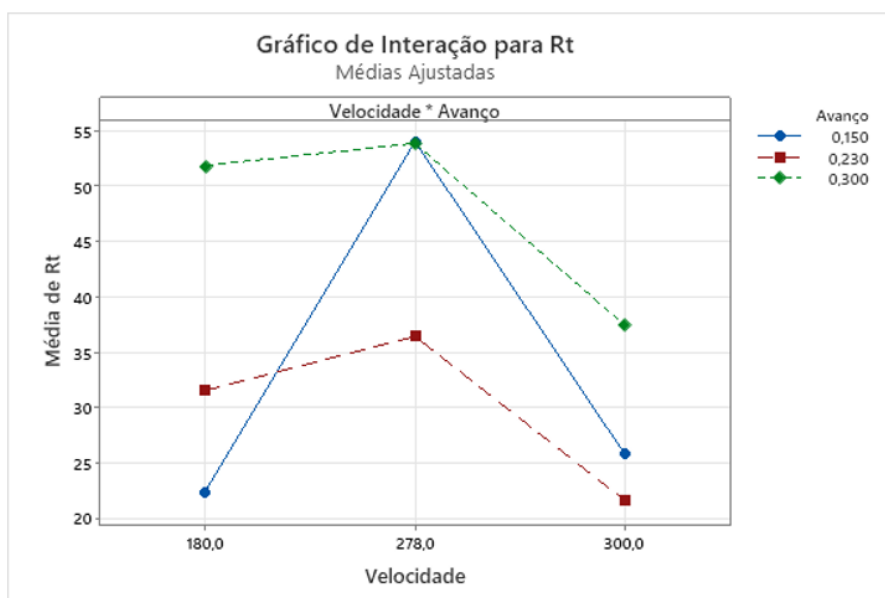
Figura 59 - Gráfico de interação do parâmetro de Rugosidade Ra – C45 +N



Fonte: Próprio autor, 2023.

Na Figura 60, é apresentada a interação para o parâmetro de rugosidade R_t , destaca-se uma interação significativa entre os três avanços, indicando uma forte correlação entre esses fatores. Esse fenômeno é claramente evidenciado pelo cruzamento das linhas associadas a esses três valores de avanço. Esse tipo de interação entre os avanços também foi observado no gráfico de interação de R_t no estado de fornecimento +SR.

Figura 60 - Gráfico de interação do parâmetro de Rugosidade R_t – C45 +N

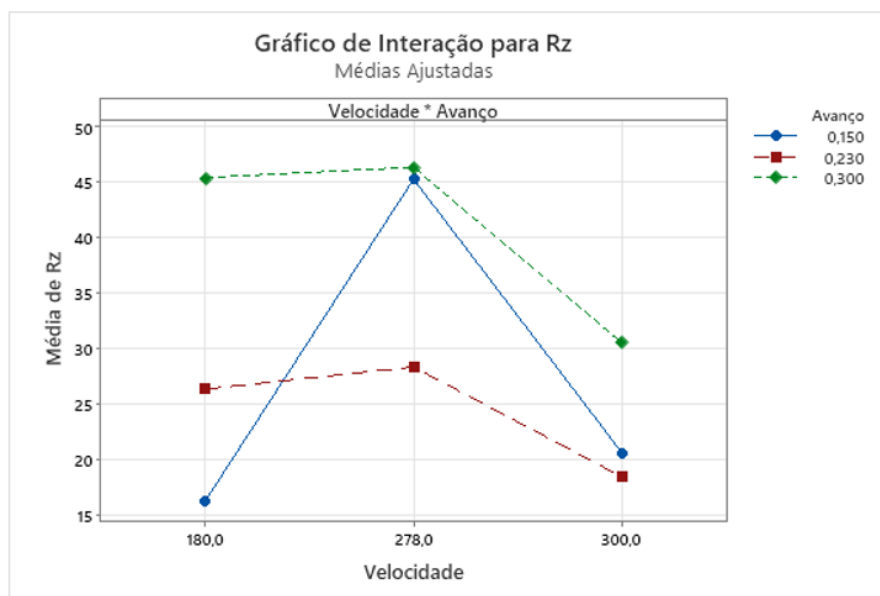


Fonte: Próprio autor, 2023.

Na Figura 61, é mostrado a interação para o parâmetro de rugosidade R_z , destaca-se uma interação significativa entre os avanços de 0,15 mm/rot e 0,23 mm/rot, conforme evidenciado pelo cruzamento das linhas associadas a esses valores de avanço. Em comparação com o gráfico de interação do mesmo parâmetro de rugosidade R_z no estado de fornecimento +SR, nota-se que a interação significativa foi entre os avanços 0,23 mm/rot e 0,30 mm/rot.

Adicionalmente, por meio da análise gráfica, é possível ressaltar como a influência da velocidade de corte na resposta varia em diferentes níveis de avanço. Observa-se que, com o avanço fixado em 0,15 mm/rot e a velocidade de corte alterada de 180 m/min para 278 m/min, a rugosidade R_z aumenta em média cerca de 30 unidades, revelando um resultado notavelmente expressivo.

Figura 61 - Gráfico de interação do parâmetro de Rugosidade Rz – C45 +N



Fonte: Próprio autor, 2023.

5.6 Análise da formação de cavacos do processo de torneamento interno a seco do aço C45

As formas dos cavacos gerados nos ensaios de torneamento foram empregadas na avaliação comparativa da usinabilidade do aço C45 nos estados de fornecimento com alívio de tensão (+SR) e normalizado (+N). Na seleção das variáveis, considerou-se a influência do avanço e da velocidade de corte, optando por uma combinação de três avanços e três velocidades de corte, mantendo a profundidade de corte constante em 0,80 mm.

Os cavacos foram submetidos à análise e classificação conforme a norma NBR ISO 3685/2017, levando em consideração a forma e o tipo de cavaco formado. Em ambas as condições, C45 +SR e C45 +N, observou-se que a forma predominante foi o cavaco fragmentado em lascas ou pedaços. Essa morfologia é semelhante aos cavacos em arco desconectado (vírgula) e cavacos fragmentados, categorizados como forma de cavaco 6.2 e 7, respectivamente, NBR ISO 3685 (2017).

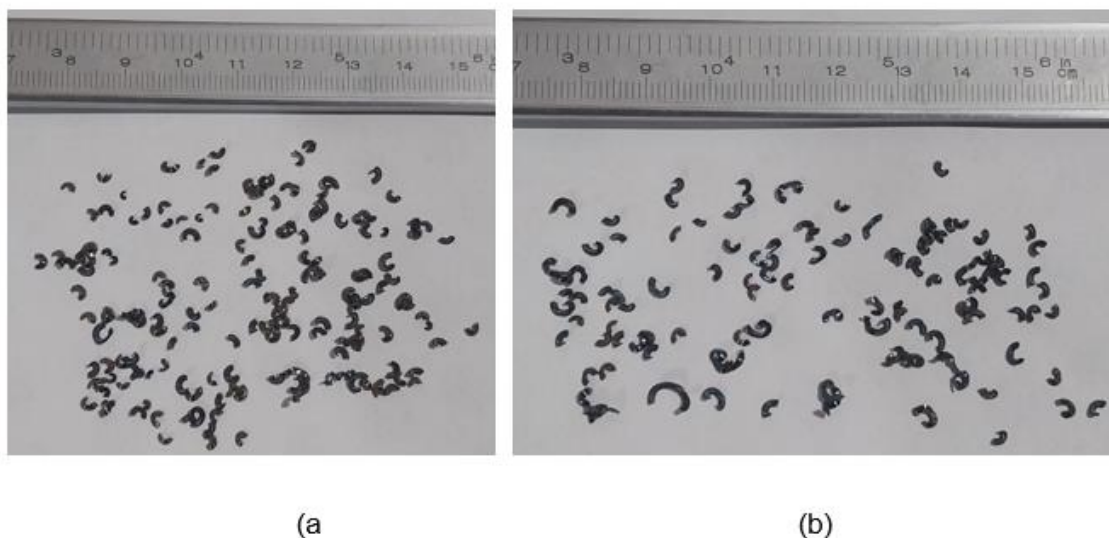
A produção de cavacos curtos ou fragmentados é um aspecto positivo na usinabilidade uma vez que apresenta diversas vantagens, como baixo volume específico, favorece a automatização dos processos, facilidade de remoção e menor risco de acidentes para o operador da máquina-ferramenta. Para uma análise mais aprofundada das características dos cavacos, utilizou-se a métrica de fixação da

velocidade de corte com a variação do avanço. De acordo com Machado et al. (2009), os parâmetros de corte que mais influenciam na forma do cavaco são o avanço, seguido pela profundidade de corte.

5.6.1 Análise dos cavacos para o aço C45 no estado de fornecimento com alívio de tensão (+SR)

Ao analisar as Figuras 62, 63 e 64, referentes aos experimentos 1 (0,15-180), 4 (0,23-180) e 7 (0,30-180), respectivamente, nos quais todos completaram o ciclo de 8 passes de torneamento, observa-se que os experimentos 0,23-180 e 0,30-180 apresentaram cavacos curtos com tendência a emaranhamento, possivelmente causados pelo desgaste de cratera no último passe do experimento 0,23-180 e pelo atingimento do VB máximo no experimento 0,30-180. Em contraste, o experimento 0,15-180 concluiu todos os passes de usinagem planejados sem problemas, mantendo uma característica consistente de cavacos fragmentados ao longo dos oito passes.

Figura 62 - Forma do cavaco do experimento 0,15-180, (a) 1º passe VB 0,037 mm e (b) 8º passe 0,110 mm - C45 +SR



Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 63 - Forma do cavaco do experimento 0,23-180, (a) 1º passe VB 0,020 mm e (b) 8º passe VB 0,086 mm - C45 +SR

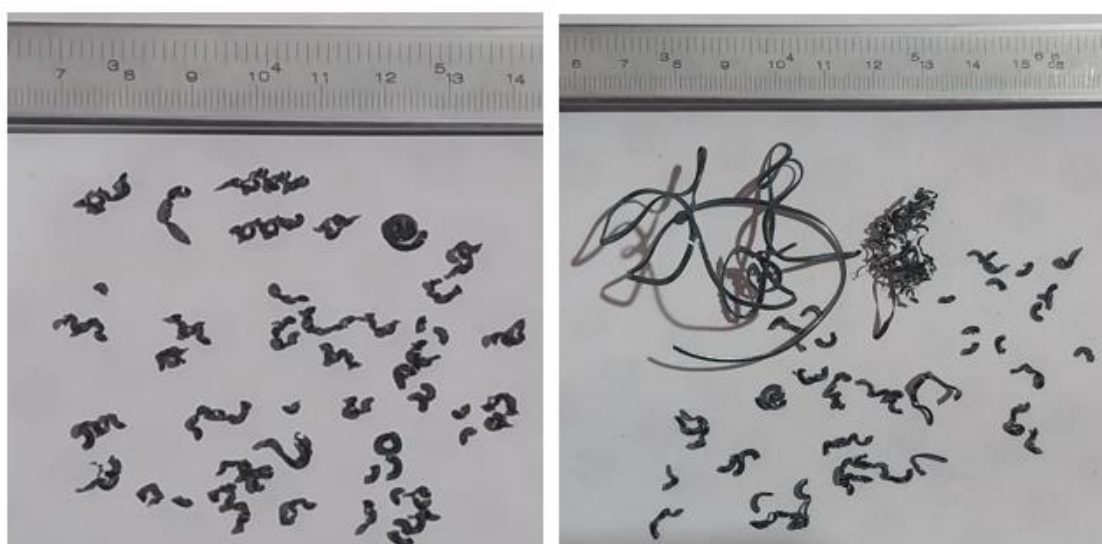


(a)

(b)

Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 64 - Forma do cavaco do experimento 0,30-180, (a) 1º passe VB 0,054 mm e (b) 8º passe VB 0,300 mm - C45 +SR



(a)

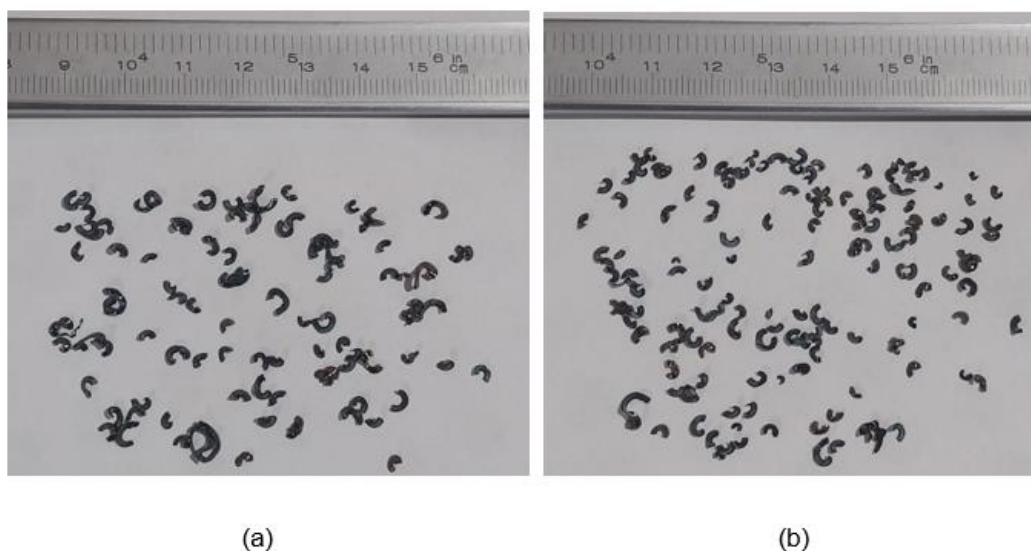
(b)

Fonte: Próprio autor, 2023.

Nas Figuras 65, 66 e 67, observa-se nos experimentos 2 (0,15-278), 5 (0,23-278) e 8 (0,30-278), respectivamente, todos completaram o ciclo de 8 passes de

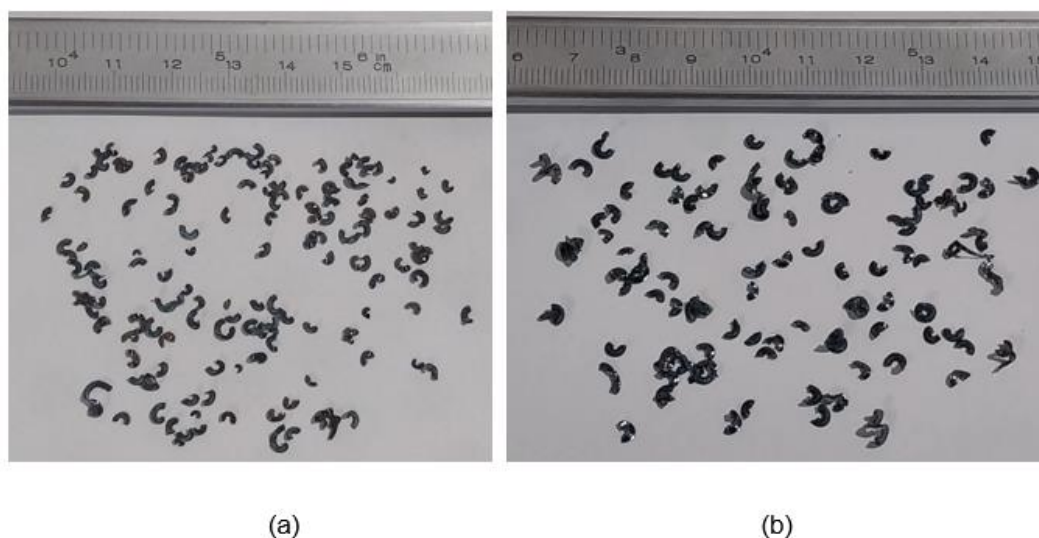
torneamento, que o experimento 0,30-278 atingiu o VB máximo no último passe, apresentando alguns cavacos com tendência a fita curta e helicoidal curto. Por outro lado, os experimentos 0,15-278 e 0,23-278 concluíram todos os passes de usinagem planejados sem problemas, mantendo a morfologia consistente de cavacos fragmentados ao longo do processo.

Figura 65 - Forma do cavaco do experimento 0,15-278, (a) 1º passe VB 0,041 mm e (b) 8º passe VB 0,170 mm - C45 +SR



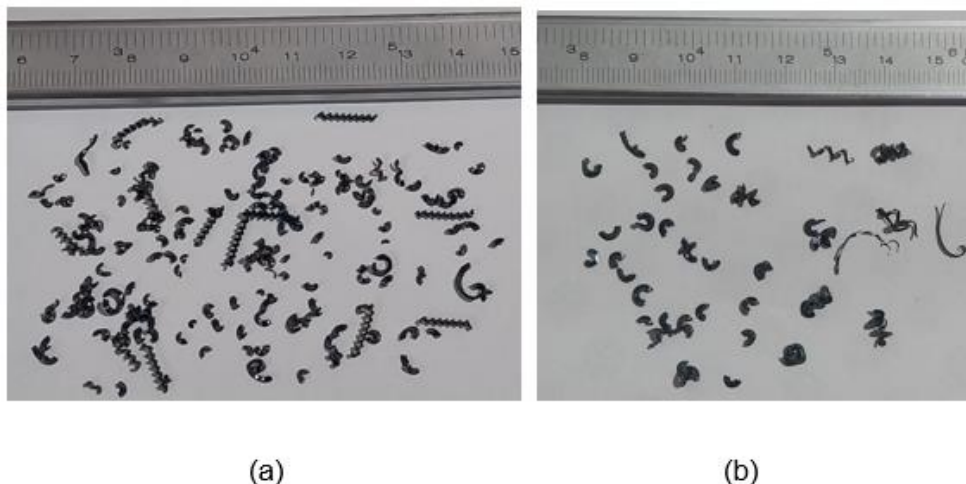
Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 66 - Forma do cavaco do experimento 0,23-278, (a) 1º passe VB 0,118 mm e (b) 8º passe VB 0,292 mm - C45 +SR



Fonte: Próprio autor, 2023.

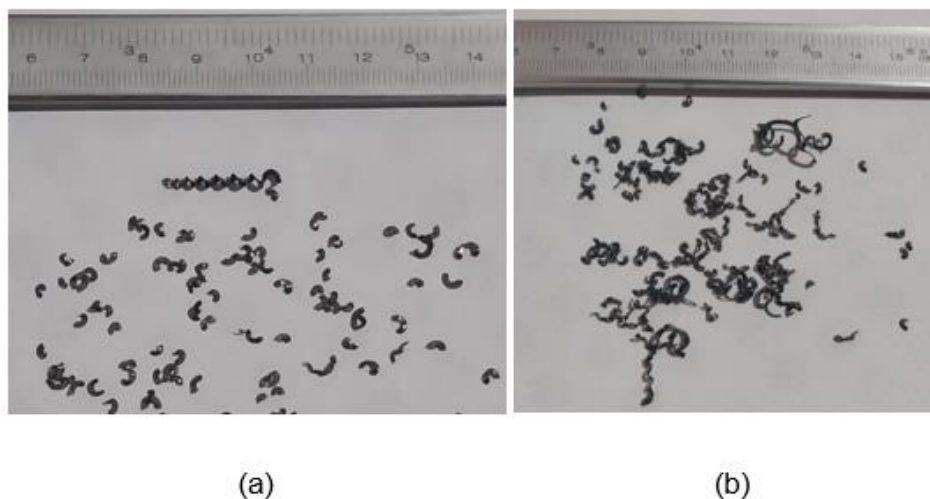
Figura 67 - Forma do cavaco do experimento 0,30-278, (a) 1º passe VB 0,102 mm e (b) 8º passe VB 0,300 mm - C45 +SR



Fonte: Próprio autor, 2023.

Nas Figuras 68, 69 e 70 é mostrado as formas básicas dos cavacos obtidas nos experimentos 3 (0,15-300), 6 (0,23-300) e 9 (0,30-300), respectivamente. Em todos esses experimentos, observa-se cavacos em forma de anéis helicoidais curtos, fita curta e fita curta emaranhada, em contraste com os experimentos anteriores que apresentaram predominantemente cavacos fragmentados. Nenhum dos experimentos concluiu os oito passes de torneamento planejados, atingindo o VB máximo no sexto, segundo e primeiro passe de usinagem nos experimentos 0,15-278, 0,23-278 e 0,30-278, respectivamente.

Figura 68 - Forma do cavaco do experimento 0,15-300, (a) 1º passe VB 0,046 mm e (b) 6º passe VB 0,300 mm - C45 +SR



Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 69 - Forma do cavaco do experimento 0,23-300, (a) 1º passe VB 0,173 mm e (b) 2º passe VB 0,300 mm - C45 +SR

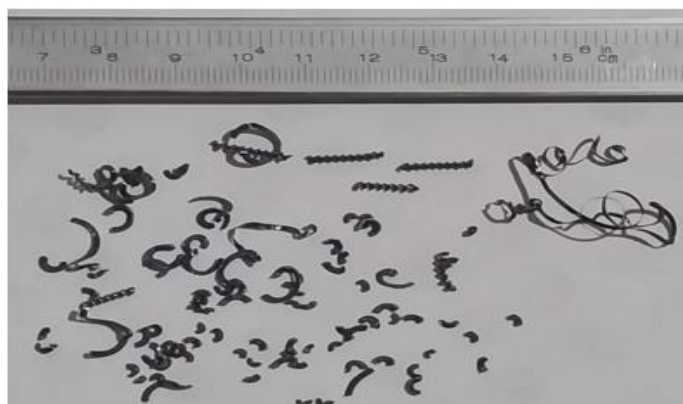


(a)

(b)

Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 70 - Forma do cavaco do experimento 0,30-300, (a) 1º passe VB 0,300 mm - C45 +SR



(a)

Fonte: Próprio autor, 2023.

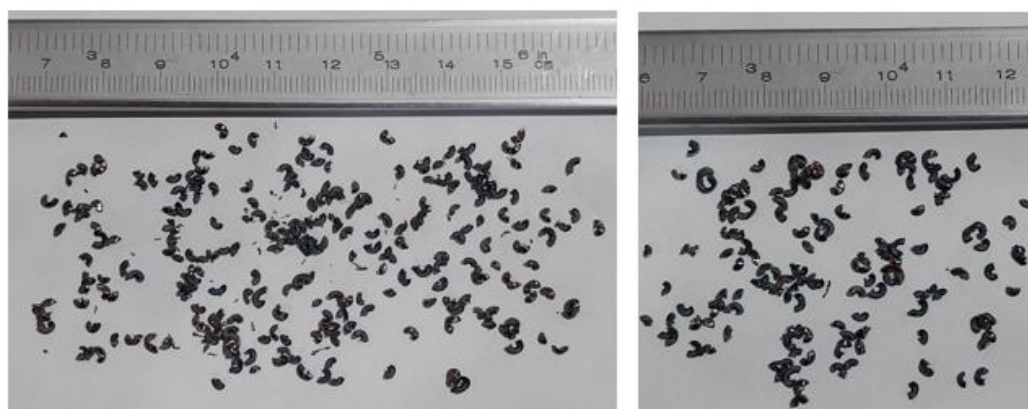
Ao comparar as características dos cavacos nos ensaios analisados, destaca-se que o parâmetro que mais impactou em sua morfologia foi o avanço de corte, corroborando com a observação de Ferraresi (2014). Os experimentos 4, 6, 7, 8 e 9, que apresentaram cavacos curtos com tendência emaranhado, fita curta e fita curta emaranhada, foram associados aos maiores avanços dentro de seus grupos, considerando a velocidade de corte como constante. Notavelmente, o experimento 3 (0,15-300), apesar de ter um avanço baixo, também apresentou uma morfologia de

cavaco prejudicada. Sugere-se que a combinação com a maior velocidade de corte pode ter contribuído para um aumento potencial da temperatura de torneamento e da força de corte, embora esses fatores não tenham sido abordados no presente estudo. Ferraresi (2014) destaca que o material da peça é o fator preponderante na classificação da forma dos cavacos e ressalta que, em geral, quanto maior a velocidade de corte, maior a tendência à produção de cavacos em fita ou contínuos. Além disso, o autor afirma que o avanço é o parâmetro mais influente, enquanto a profundidade de corte exerce uma menor influência na morfologia dos cavacos.

5.6.2 Análise dos cavacos para o aço C45 no estado de fornecimento normalizado (+N)

No que diz a respeito aos cavacos gerados, é mostrado nas Figuras 71, 72 e 73, correspondentes aos experimentos 1 (0,15-180), 4 (0,23-180) e 7 (0,30-180), respectivamente, observa-se que todos concluíram o ciclo de 5 passes de usinagem planejados sem apresentar diferenças significativas, mantendo a característica consistente de cavacos fragmentados.

Figura 71 - Forma do cavaco do experimento 0,15-180, (a) 1º passe VB 0,159 mm e (b) 5º passe VB 0,201 mm - C45 +N

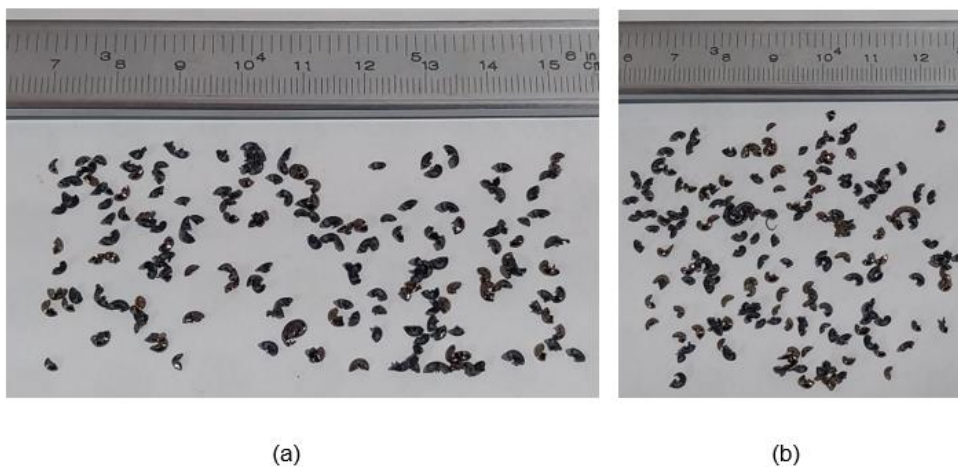


(a)

(b)

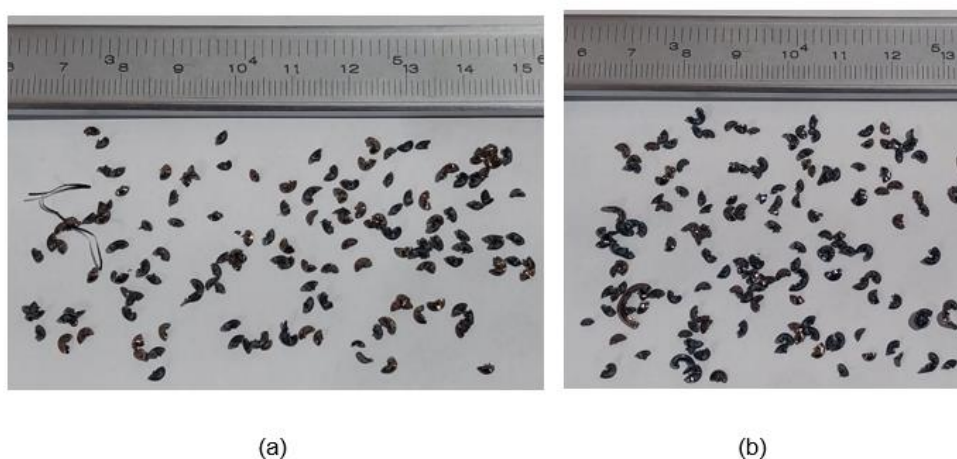
Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 72 - Forma do cavaco do experimento 0,23-180, (a) 1º passe VB 0,193 mm e (b) 5º passe VB 0,262 mm - C45 +N



Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 73 - Forma do cavaco do experimento 0,30-180, (a) 1º passe VB 0,108 mm e (b) 5º passe VB 0,162 mm - C45 +N



Fonte: Próprio autor, 2023.

As Figuras 74, 75 e 76 é exibido a morfologia dos cavacos obtidos nos experimentos 2 (0,15-278), 5 (023-278) e 8 (0,30-278), respectivamente. O ciclo planejado de 5 passes de torneamento foi completado por todos os experimentos, apresentando, em geral, a formação de cavacos na forma fragmentada, desconectados e tipo vírgula. No entanto, identificou-se uma causa especial no experimento 2 (0,15-278), que resultou em cavacos do tipo fita curta emaranhada no segundo passe de usinagem. A causa especial foi atribuída pelo desgaste do assento da pastilha no suporte, o qual foi substituído. O experimento prosseguiu sem

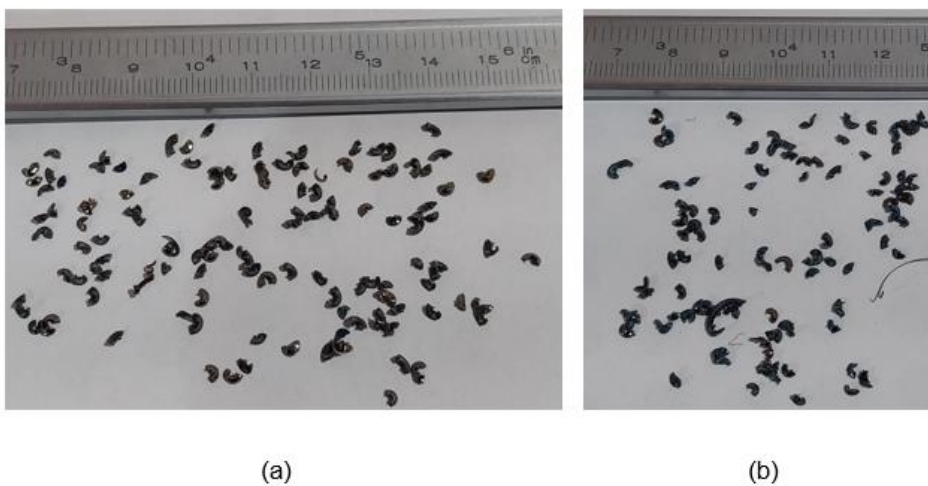
apresentar mais problemas, mantendo o mesmo tipo de cavaco fragmentado observado nos outros dois experimentos deste grupo.

Figura 74 - Forma do cavaco do experimento 0,15-278, (a) 1º passe VB 0,184 mm e (b) 5º passe VB 0,239 mm - C45 +N



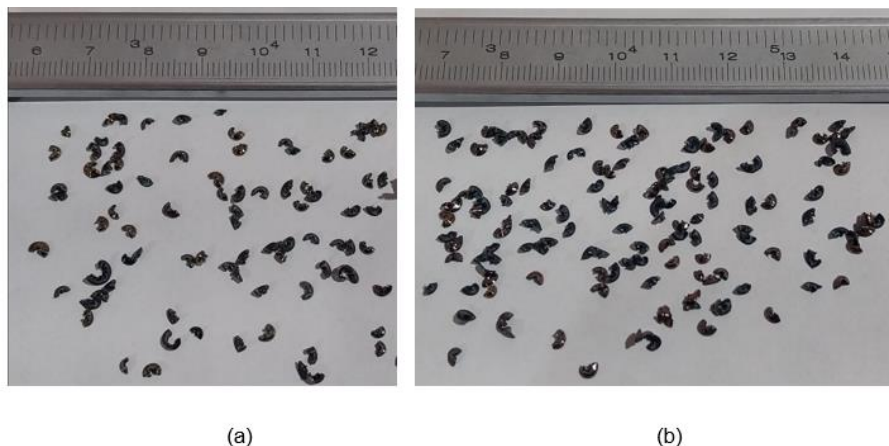
Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 75 - Forma do cavaco do experimento 0,23-278, (a) 1º passe VB 0,154 mm e (b) 5º passe VB 0,218 mm - C45 +N



Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 76 - Forma do cavaco do experimento 0,30-278, (a) 1º passe VB 0,114 mm e (b) 5º passe VB 0,201 mm - C45 +N



Fonte: Próprio autor, 2023.

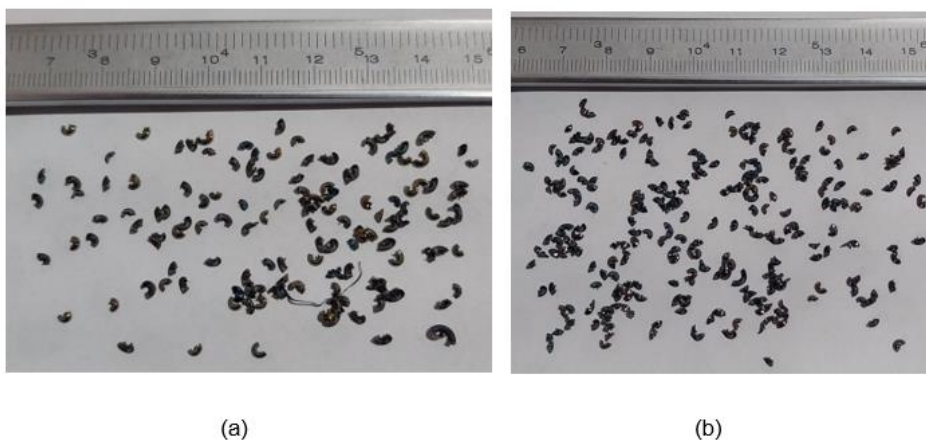
Ao analisar as Figuras 77, 78 e 79, é apresentado as formas dos cavacos obtidas nos experimentos 3 (0,15-300), 6 (023-300) e 9 (0,30-300), respectivamente. Nota-se que os experimentos 3 e 6 completaram o ciclo de cinco passes de torneamento conforme planejado, apresentando a formação de cavacos na forma fragmentada. Já o experimento 9 (0,30-300) exibiu a morfologia do cavaco em fita curta e mais espessa. Esse comportamento pode ter sido influenciado pelo desgaste da ferramenta de corte, que atingiu o VB máximo planejado durante o segundo passe de usinagem, uma situação semelhante ao experimento 9 do material C45 no estado de fornecimento com alívio de tensão (+SR), caracterizando um cenário propenso ao conjunto de parâmetros com avanço e velocidade de corte mais elevados entre todos os experimentos.

Figura 77 - Forma do cavaco do experimento 0,15-300, (a) 1º passe VB 0,146 mm e (b) 5º passe VB 0,177 mm - C45 +N



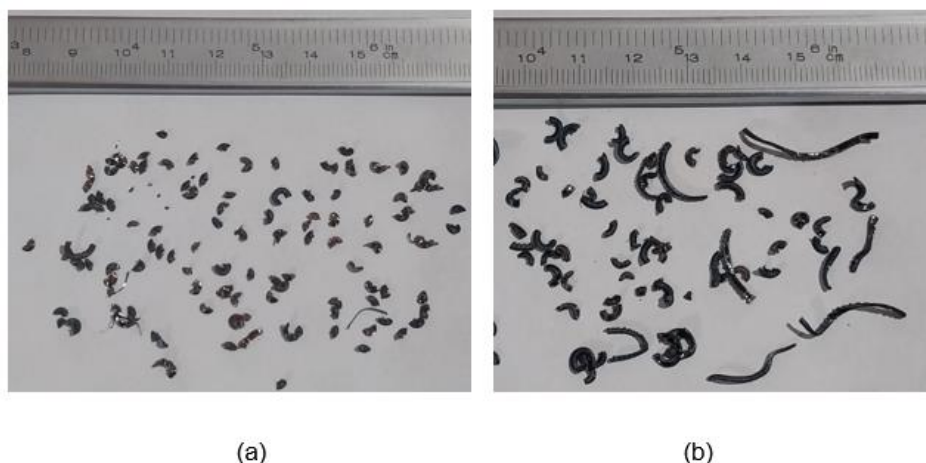
Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 78 - Forma do cavaco do experimento 0,23-300, (a) 1º passe VB 0,132 mm e (b) 5º passe VB 0,210 mm - C45 +N



Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 79 - Forma do cavaco do experimento 0,30-300, (a) 1º passe 0,215 mm e (b) 2º passe VB 0,300 mm - C45 +N



Fonte: Próprio autor, 2023.

Ao comparar as características dos cavacos produzidos nos experimentos realizados com o material C45 nos estados de fornecimento com alívio de tensão (+SR) e normalizado (+N), observa-se, em geral, que o estado +N apresentou menos problemas na formação dos cavacos. Nestes experimentos, a morfologia dos cavacos permaneceu predominantemente fragmentada. Em contraste, a maioria dos experimentos com o C45 +SR enfrentou dificuldades na formação dos cavacos, resultando em morfologias diversas, como cavacos curtos com tendência emaranhado, em fita curta e fita curta emaranhada.

Assim, nos experimentos realizados com o aço C45 +N, foi observada uma maior estabilidade na formação dos cavacos, com uma menor variação em sua morfologia. Essa consistência pode ser atribuída à microestrutura do material, que desempenha um papel significativo no desempenho da operação de usinagem. A estrutura normalizada do material passa por um processo de aquecimento na temperatura de austenitização por tempo suficiente para completa normalização, seguido de resfriamento até a temperatura ambiente. Esse processo resulta em propriedades mecânicas e uma estrutura que proporciona condições mais favoráveis para a usinagem, demonstrando neste presente estudo ser independentemente das diversas configurações de parâmetros de corte utilizadas nos experimentos.

5.7 Análise do desgaste da aresta de corte ou flanco (VB) em função do volume usinado (Q)

Para realizar uma avaliação comparativa do desgaste da aresta de corte ou do flanco da ferramenta de torneamento, adotou-se o critério de fim de vida útil, considerando o valor máximo de VB = 0,30 mm conforme a norma NBR ISO 3685 (2017).

A análise dos resultados, conforme é ilustrado na Figura 80, observa-se que os experimentos realizados no estado de fornecimento normalizado (+N) apresentaram um comportamento consistente, com um desgaste de flanco regular que aumenta de forma estável com o volume usinado ao longo dos experimentos. Esse padrão contrasta com os experimentos conduzidos no estado de fornecimento com alívio de tensão (+SR), conforme é evidenciado na Figura 81, onde a estabilidade do desgaste de flanco é inferior, apresentando variações mais acentuadas com o aumento do volume usinado.

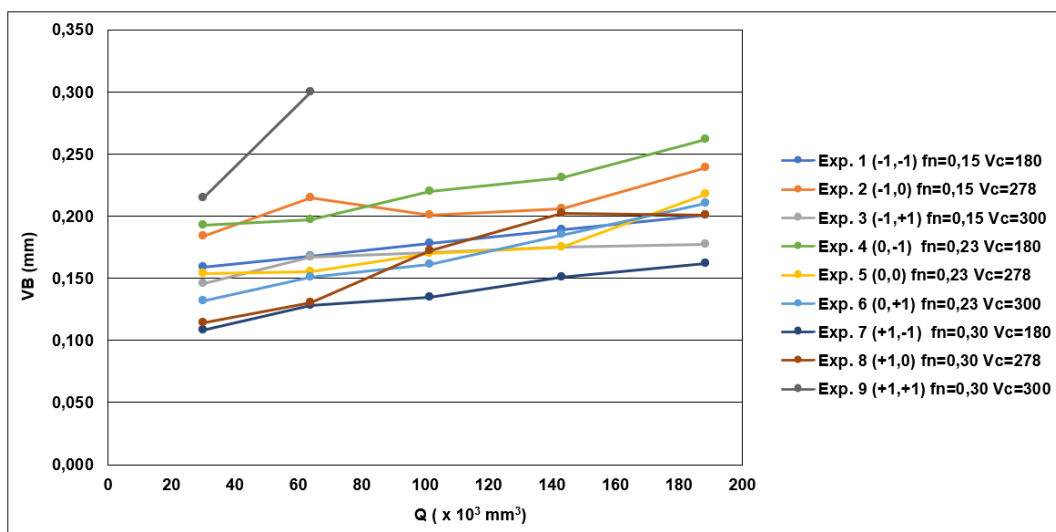
Observou-se para o estado de fornecimento +N que apenas no experimento 9 (0,30-300) ocorreu o desgaste máximo de VB de 0,30 mm antes de atingir o volume máximo de usinagem estabelecido em $188,50 \times 10^3 \text{ mm}^3$ e no segundo passe de usinagem do experimento 2, identificou-se um aumento no desgaste do flanco do inserto de usinagem o qual foi causado pelo desgaste no assento da pastilha do suporte de fixação. Após a substituição do suporte, os valores do desgaste de flanco reduziram e o ensaio foi finalizado no último passe de usinagem com o desgaste de flanco menor que o máximo estabelecido no experimento. No estado +SR, os

experimentos 3 (0,15-300), 5 (0,23-278) e 9 (0,30-300) apresentaram desgaste máximo de VB de 0,30 mm antes de alcançar o volume máximo de $168,75 \times 10^3 \text{ mm}^3$ estabelecido para esses experimentos. Este comportamento é consistente com as observações de Hulsendeger (2017), que notou uma tendência semelhante ao aplicar a maior velocidade de corte proposta, onde o inserto utilizado quase atingiu o valor máximo de desgaste aceitável no primeiro passe. A condição observada por Hulsendeger (2017) pode ter sido corroborada no presente estudo com o aumento do avanço combinado com a velocidade de corte mais alta.

No entanto, é importante notar que o aço C45 submetido ao tratamento térmico de normalização (+N) apresentou, em média, valores de desgaste por volume relativamente mais elevados em comparação com o tratamento térmico de alívio de tensão (+SR). Essa observação decorre do fato de que o grupo de experimentos no estado +N teve um desgaste de flanco com valores mais elevados nos primeiros volumes usinados, variando na maioria entre 0,100 mm e 0,200 mm, finalizando entre 0,150 mm e 0,250 mm. Enquanto isso, o grupo de experimentos no estado +SR teve um início de desgaste de flanco com valores mais baixos nos primeiros volumes usinados, variando principalmente entre aproximadamente 0,025 mm e 0,125 mm, finalizando entre aproximadamente 0,075 mm e 0,300 mm.

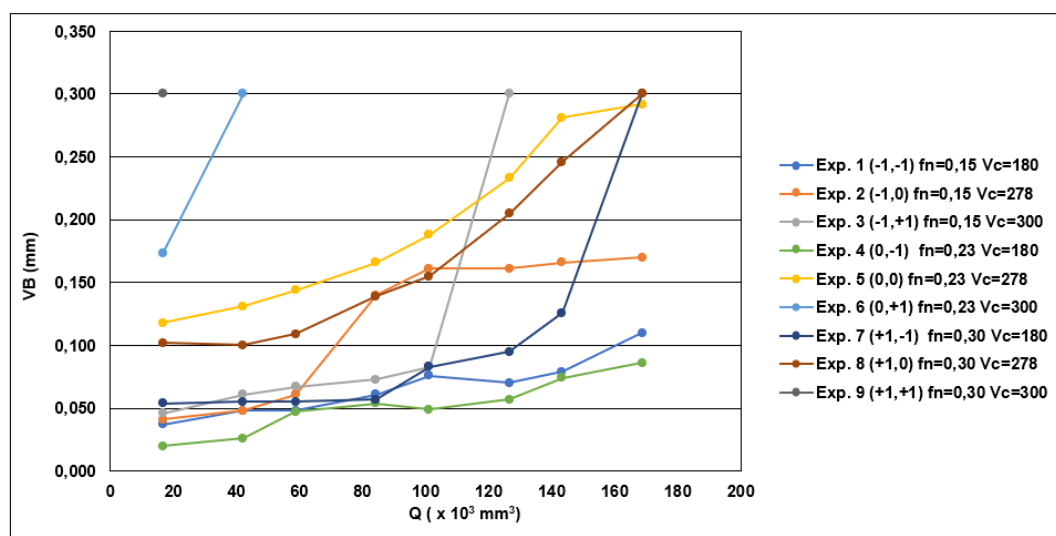
Os experimentos 7 (0,30-180), 3 (0,15-300), 8 (0,30-278) e 1 (0,15-180) destacaram-se como os de melhor desempenho no estado de fornecimento +N. Já no estado de fornecimento +SR, os experimentos com melhor desempenho foram 4 (0,23-180), 1 (0,15-180) e 2 (0,15-278). Conforme apontado por Ferraresi (2014), uma medida eficaz para reduzir significativamente o desgaste da ferramenta de corte é diminuir a velocidade de corte, combinada com o aumento do avanço. Essa afirmação se confirma ao compararmos os resultados dos Ensaios 7 (0,30-180) no estado +N e 4 (0,23-180) no estado +SR, nos quais os valores obtidos para o desgaste de flanco desses experimentos são menores do que nos demais.

Figura 80 - Gráfico dos desgastes da aresta de corte ou flanco (VB) em relação ao volume usinado (Q) - C45 +N



Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 81 - Gráfico dos desgastes da aresta de corte ou flanco (VB) em relação ao volume usinado (Q) - C45 +SR



Fonte: Próprio autor, 2023.

Os resultados evidenciam que o tratamento térmico de alívio de tensão (+SR) demonstra um desempenho superior em termos de desgaste de flanco nos primeiros passes de usinagem, especialmente para menores volumes usinados e parâmetros de corte mais moderados, como avanços e velocidades de corte reduzidos. Em contrapartida, o tratamento térmico de normalização (+N) exibe um desempenho mais consistente em termos de desgaste de flanco por volume usinado,

independentemente das configurações de avanço e velocidade de corte. Santana (2011) ressaltou em sua pesquisa que o avanço não desempenha um papel preponderante na vida útil da ferramenta, tendo maior impacto na qualidade superficial da peça usinada. Assim, sugere-se que o estado de fornecimento +N teve relevância para o melhor desempenho nas combinações de parâmetros de corte apresentadas, corroborando que o processo de tratamento térmico de normalização visa aumentar o tamanho de grão, reduzindo a dureza e, conseqüentemente, aprimorando a usinabilidade do metal.

A comparação direta entre os resultados dos dois tratamentos térmicos destaca a influência significativa da escolha adequada do estado de fornecimento, seja +N ou +SR, em relação à usinabilidade do aço C45 trefilado a frio durante o torneamento interno a seco, considerando a aplicação final.

6 CONCLUSÃO

A presente pesquisa conduziu uma análise dos dados derivados de investigação experimental e analítica sobre a usinabilidade por meio de torneamento interno a seco do aço C45, originário de tubos de aço trefilados sem costura e submetidos previamente a tratamentos térmicos de normalização e alívio de tensão.

Ao longo dos experimentos realizados neste trabalho, concluiu-se que:

A composição química, propriedades mecânicas, dureza e microestrutura são compatíveis aos dois estados de fornecimento, alívio de tensão (+SR) e normalização (+N).

Observou-se que o tratamento térmico de alívio de tensão (+SR) apresentou um desempenho superior no que diz respeito ao desgaste de flanco nos primeiros passes de usinagem, especialmente para volumes usinados menores e parâmetros de corte como avanços e velocidades de corte reduzidos. Por outro lado, o tratamento térmico de normalização (+N) demonstrou um desempenho mais consistente em termos de desgaste de flanco por volume usinado, independentemente das configurações de avanço e velocidade de corte.

A análise da relação entre rugosidade e volume indicou que o aumento do volume frequentemente resultou em maior rugosidade no tratamento de normalização, enquanto no tratamento de alívio de tensão, a tendência foi inversa.

De maneira geral, observou-se uma tendência de aumento na rugosidade à medida que o avanço foi incrementado. Foi observado que experimentos com os menores avanços, 0,15 mm/rot e 0,23 mm/rot, apresentaram os melhores resultados em ambos os estados de fornecimento.

No que diz respeito à análise de cavacos, observou-se que no estado de fornecimento +SR, as combinações que apresentaram as melhores condições de cavaco foram aquelas com os menores avanços, especificamente as combinações avanço e velocidade de corte: 0,15-180, 0,15-278 e 0,23-278. Já no estado de fornecimento +N, observou-se que quase todos os parâmetros de corte apresentaram os melhores desempenhos, abrangendo tanto combinações avanço e velocidade de corte com parâmetros mais baixos quanto os mais altos, com exceção do parâmetro 0,30-300 que foi o de pior desempenho.

Ao comparar as características dos cavacos produzidos nos experimentos com o material C45 nos estados de fornecimento com alívio de tensão (+SR) e normalizado

(+N), nota-se, em geral, que o estado +N apresentou menos problemas na formação dos cavacos. Nos experimentos +N, a morfologia dos cavacos permaneceu predominantemente fragmentada. Em contraste, a maioria dos experimentos com o C45 +SR enfrentou dificuldades na formação dos cavacos, resultando em morfologias diversas, como cavacos curtos com tendência emaranhada, em fita curta e fita curta emaranhada.

O estudo estatístico evidenciou, para os três parâmetros de rugosidade, que em todo o modelo, fatores individuais e na interação são estatisticamente significativos a um nível de 5 % (P-Valor $<0,05$). Isso indica que pelo menos um fator de uma das variáveis independentes estudadas tem um efeito significativo na variável dependente.

Esta pesquisa revelou os desafios significativos inerentes à metodologia da usinagem interna a seco, proporcionando uma compreensão aprofundada das interações entre os tratamentos térmicos, variáveis do processo de usinagem, parâmetros de rugosidade, desgaste e tipos de cavacos, especialmente no contexto do aço C45 proveniente de tubos trefilados sem costura. Os resultados obtidos constituem orientações valiosas para a escolha de tratamentos térmicos apropriados e para otimizações nos processos de usinagem, por meio da seleção adequada de variáveis no processo de torneamento interno a seco com o intuito em aprimorar a usinabilidade e a qualidade das peças fabricadas com o aço C45.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Conduzir novos ensaios de torneamento interno utilizando tubos trefilados sem costura em aço C45, considerando os estados de fornecimento com alívio de tensão e normalizado, e analisar a influência de outros parâmetros de usinagem, tais como, tensão residual, força de usinagem, temperatura, fluido de corte e maior profundidade de corte. Além disso, realizar a caracterização da superfície usinada e dos insertos de corte por meio do Microscópio de Eletrônico de Varredura (MEV), caracterizar os mecanismos de desgastes e comparar o desgaste das ferramentas com diferentes tipos de revestimento. Estabelecer os intervalos ou faixas de classificação dos coeficientes de variação e/ou dos índices de variação conforme proposto por Garcia (1989) e/ou Costa et al. (2002) em pesquisas relacionadas às variáveis do processo de torneamento e em outros tipos de processos de usinagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEDFAR, A.; SADEGHI, A. (2019). Response surface methodology for investigating the effects of sourdough fermentation conditions on Iranian cup bread properties. **Heliyon**. vol. 5, e02608.

AMORIM, Heraldo José de. **Estudo da Relação entre Velocidade de corte, Desgaste da Ferramenta, Rugosidade e Forças de usinagem em torneamento com ferramentas de metal duro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

ANNIGERI, U.K.; CHARAN, M.; SAI, M.V.; CHARAN, T.R.; SAI, L.R. Effect of turning parameters on Al6351 T6 by using Design of Experiments. **IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.** vol. 149, p. 1-7, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA. **ABNT NBR ISO 513**: Classificação e aplicação de metais duros para a usinagem com arestas de corte definidas – Designação dos grupos principais e grupos de aplicação. Brasil, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA. **ABNT NBR ISO 3685**: Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento. Brasil, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA. **ABNT NBR ISO 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Brasil, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A370**: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. USA, 2023.

BANARU, A.M.; AKSENOV, S.M. Complexity of Molecular Nets: Topological Approach and Descriptive Statistics. **Symmetry**. vol. 14, n. 2, p. 220, 2022.

BJURKA, E. **Analyze of insert geometries, wear types and insert life in milling**. 2011. 67f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Mecânica Aplicada. Chalmers University of Technology, Goteborg, 2011.

BOX, G. **Statistics for experimenters**, Wiley Series in Probability and Statistics, 1978.

BRUNATTO, Sílvia Francisco. **Introdução aos estudos dos aços**. 2016. Disponível em:

<<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM052/Prof.Silvio/INTRODU%C3%87%C3%83O%20AO%20ESTUDO%20DOS%20A%C3%87OS-Parte%203.pdf>>. Acesso em: 07 dez. 2023.

BREITKREITZ, M.C.; SOUZA, A.M.; POPPI, R.J. Experimento didático de quimiometria para planejamento de experimentos: avaliação das condições experimentais na determinação espectrofotométrica de ferro ii com o-fenantrolina. um tutorial, parte iii. **Quim. Nova**. vol. 37, n. 3, p. 564-573, 2014.

BUDINSKI, K. G. **Surface engineering for wear resistance**. New Jersey: Prentice Hall, Inc, 1988.

BUSTAMANTE, G. D. **Influência das dimensões da peça na evolução do desgaste de ferramentas de corte no processo de fresamento**. 2017. 92f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

CALLISTER, Willian D., JR., RETHWISCH, David G.; **Materials Science and Engineering: An Introduction**. USA, Wiley, 10ª edição, 2016.

CAMPOS, P. H. S. et al. Modelagem da rugosidade (Ra, Rt) no torneamento duro com cerâmica mista alisadora utilizando projetos de experimentos (DOE). In: **XXXI ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, 2011, Belo Horizonte.

CHIAVERINI, V., **Tecnologia Mecânica: Materiais de Construção Mecânica**. São Paulo: Mc Graw Hill do Brasil, 9ª edição, 2018.

CONNER, B.; JOHNSON, E. Descriptive statistics. **American Nurse Today**. vol. 12, n. 11, p. 52-55, 2017.

COSTA, N.H.A.D.; SERAPHIN, J.C.; ZIMMERMANN, F.J.P. **Novo método de classificação de coeficientes de variação para a cultura do arroz de terras altas**. Pesq. Agropecuária. Bras., v.37, p.243-249, 2002

CUNHA, E. A.; RIBEIRO, M. V. **Influência da velocidade de corte na rugosidade em usinagem nas ligas de alumínio**. In: 2º COBEF – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2003, Uberlândia, MG. p. 1-10. Disponível em:

< http://www.abcm.org.br/anais/cobef/2003/artigos/COF03_0840.pdf >. Acesso em 16 dezembro 2013.

DEARNLEY, P. A., TRENT, E.M., **Wear mechanisms of coated carbides tools**. Metals technology. 1982.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 10083-2: Steels for quenching and tempering**. Beuth Verlag, Berlin 2006.

DIEI, EN.; DORNFELD, DA. A Model of Tool Fracture Generated Acoustic Emission During Cutting. **Journal of Engineering for Industry**, [S. l.], n. 3, v. 109, p. 234-240, 1987.

DINIZ, A.E; MARCONDES, F.C; COPPINI, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 9ª. Ed. São Paulo: Artliber, 2014.

EVANGELISTA, L. N.; GALVANINI, Lucas de Toledo Barros; MACHADO, Alisson Rocha. **Tecnologias de Melhoria da Usinabilidade Dos Aços – Uma Revisão, 9º Colóquio de Usinagem**, LEPU/FEMEC, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2003.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 5 ed. São Paulo: Blücher, 1977.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 17^a Ed. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 2014.

FIELD, Andy. **Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics**. University of Sussex, UK, 2000.

GARCIA, C.H. **Tabelas para classificação do coeficiente de variação**. Piracicaba: IPEF, 1989. 12p. (Circular técnica, 171).

GELMAN, Andrew, e Jennifer Hill. **Data Analysis Using Regression and Multilevel/Hierarchical Models**. Cambridge University, 2006.

GOMES, F.P. **Curso de estatística experimental**. 13.ed. São Paulo: ESALQ/USP, 1985.

GOMES, F.P. **O índice de variação, um substituto vantajoso do coeficiente de variação**. Piracicaba: IPEF, 1991. 4p. (Circular técnica, 178).

GRZESIK, W.; WANAT, T. Comparative assessment of surface roughness produced by hard machining with mixed ceramic tools including 2D and 3D analysis. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 169, p. 364-371, 2005.

HAHN, Sookap. Os papéis da ciência dos materiais e da engenharia para uma sociedade sustentável. **Estudos Avançados**, São Paulo, Brasil, v. 8, n. 20, p. 36–42, 1994. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/9645>. Acesso em: 29 abr. 2024.

HAIR, J. F., Anderson, R. E., Tatham, R. L., & Black, W. C. (1998). **Multivariate Data Analysis**. Prentice Hall.

HÜLSENDEGER, G. V. C. **Desgastes e vida de ferramentas de metal-duro classes ISO-P e ISO-S durante o torneamento duro do aço SAE 4140 no corte a seco e com MQL**. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

HUTCHINGS, I M.; SHIPWAY, P. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. Oxford, UK: Butterworth Heinemann, 2017.

JAMES DHILIP, J.D.; JEEVAN, J.; ARULKIRUBAKARAN, D.; RAMESH, M.

INVESTIGATION AND OPTIMIZATION OF PARAMETERS FOR HARD TURNING OF OHNS STEEL. **Materials and Manufacturing Processes**. vol. 35, n. 10, p. 1113-1119, 2020.

JIMÉNEZ, M.; AGUILAR, J.; MONSALVE-PULIDO, J.; MONTOYA, E. An automatic approach of audio feature engineering for the extraction, analysis and selection of descriptors. **International Journal of Multimedia Information Retrieval**. vol. 10, n. 1, p. 33-42, 2021.

KOUSHI, M.; DANESHVAR, E.; DOPEIKAR, H.; TAGHAVI, D.; BHATNAGAR, A. Box–Behnken design optimization of Acid Black 1 dye biosorption by different brown macroalgae. **Chemical Engineering Journal**. vol. 179, p. 158-168, 2012.

KUMAR, Ch.S.; MAJUMDER, H.; KHAN, A.; PATEL, S.K. Applicability of DLC and WC/C low friction coatings on Al₂O₃/TiCN mixed ceramic cutting tools for

dry machining of hardened 52100 steel. **Ceramics International**. vol. 46, p. 11889-11897, 2020.

KUMAR, S.S.; ERDEMIR, F.; VAROL, T.; KUMARAN, S.T.; UTHAYAKUMAR, M.; CANAKCI, A. Investigation of WEDM process parameters of Al-SiC-B4C composites using response surface methodology. **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture**. vol. 3, n. 2, p. 127-135, 2020.

KUSUMA, S.A.F.; PARWATI, I.; ROSTINAWATI, T.; YUSUF, M.; FADHLILLAH, M.; AHYUDANARI, R.R.; RUKAYADI, Y.; SUBROTO, T. (2019) Optimization of culture conditions for Mpt64 synthetic gene expression in Escherichia coli BL21 (DE3) using surface response methodology. **Heliyon**. vol. 5, e02741.

KUTNER, M. H., Nachtsheim, C. J., & Neter, J. (2004). **Applied Linear Statistical Models**. McGraw-Hill.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R.T.; SILVA, M. B. da. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher, 2009.

MACHADO, A. R. et. al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 3. ed. rev. e atual. São Paulo: Blucher, 2015.

Maia, A. G. **Econometria: Conceitos e Aplicações**. Editora Saint Paul, 2017.

MILLS, B. REDFORD, A. H. **Machinability of engineering materials**, Applied Science Publishers. London, 1983.

MITSUBISHI MATERIALS. **Materials: torneamento interno**. Disponível em: <https://www.mmc-carbide.com/br/technical_information/tec_turning_tools/tec_boring>. Acesso em: 15 julho 2023.

MONTGOMERY, D. C.; RUNTER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 6. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC. 2016.

NICK, T.G. **Descriptive statistics. Topics in biostatistics**. p. 33-52, 2007.

PINHEIRO, J.M.; SALÚSTIO, S.; VALENTE, A.A.; SILVA, C.M. Adsorption heat pump optimization by experimental design and response surface methodology. **Applied Thermal Engineering**. vol. 138, p. 849-860, 2018.

SAHOO, C.; GUPTA, A.K. Optimization of photocatalytic degradation of methyl blue using silver ion doped titanium dioxide by combination of experimental design and response surface approach. **Journal of Hazardous Materials**. vol. 215-216, p. 302-310, 2012.

SANDVIK COROMANT. **Manual técnico de usinagem**. Santo Amaro, 2010.

SANDVIK COROMANT. **Materials: cutting tool materials**. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>>. Acesso em: 17 dezembro 2023.

SANTANA, M. S. **Estudo de parâmetros de usinagem do aço SAE 4140 no torneamento cnc**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, SE, 2011.

SANTOS, Sandro Cardoso; SALES, Wisley Falco. **Fundamentos da Usinagem dos Materiais**. Belo Horizonte: PUC Minas, 2013 (Apostila).

SEDLACEK, M.; PODGORNIK, B.; VIZINTIN, J. **Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear**. *Wear*, v. 266, p. 482-487, 2009.

SHENG, J.; CHIU, Y. J.; LIN, B. J. **Determination of a coupling equation for milling parameters based on optimal cutting temperature**. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, London, 2017.

SILVA, Amanda Cristina Medeiros da. **Tratamento térmico de têmpera no aço SAE 1040 em diferentes meios de resfriamento**. Trabalho de Conclusão de Curso: Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, 2016.

SILVA, André Luiz V. da Costa e. **Aços e ligas especiais**. 2ª edição, Editora Blucher, São Paulo, 2006.

SOARES, C. L.; RUBIO, J. C. C. **Torneamento do ferro fundido nodular GGG40: estudo sobre a influência de variáveis essenciais**. In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2015, Ponta Grossa, PR. p. 1-12. Disponível em:

< www.aprepro.org.br/conbrepro/2015/down.php?id=822&q=1 >. Acesso em 16 dezembro 2023

SOLTANI, R.D.C.; REZAEI, A.; KHATAEE, A.R.; SAFARI, M. Photocatalytic process by immobilized carbon black/ZnO nanocomposite for dye removal from aqueous medium: Optimization by response surface methodology. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**. vol. 20, p. 1861-1868, 2014.

SOUZA, F. L. C. de et al. **Avaliação do processo de formação de cavaco no torneamento do aço ABNT 1045**. Faculdade de Engenharia. Departamento de Engenharia Mecânica. Engenharia Mecânica - Campus Ilha Solteira, 2016.

STACHOWIAK, G. W., BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**. 4ª ed., Elsevier, Oxford, UK, 2014.

STOETERAU, R. L. **Processos de Usinagem: Fabricação por Remoção de Material**. Apostila de disciplina: Processos de usinagem. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis - UFSC. Florianópolis: UFSC, 2015.

YONGFAN, L.; SHUAI, Z.; JING, W. Research on the Optimization Design of Motorcycle Engine Based on DOE Methodology. **Procedia Engineering**. vol. 174, p. 740-747, 2017.