

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

Thaís Ramos Capai Jardim

**Aplicabilidade do ensaio de compressão de anel para determinar o coeficiente de atrito  
no ensaio de torneamento do aço ABNT 1045**

Belo Horizonte

2023

Thaís Ramos Capai Jardim

**Aplicabilidade do ensaio de compressão de anel para determinar o coeficiente de atrito  
no ensaio de torneamento do aço ABNT 1045**

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

Área de concentração: Engenharia de Manufatura e materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Araújo Câmara

Coorientador: Prof. Dr. Frederico de Castro Magalhães

Belo Horizonte

2023

J37a

Jardim, Thais Ramos Capai.

Aplicabilidade do ensaio de compressão de anel para determinar o coeficiente de atrito no ensaio de torneamento do aço ABNT 1045 [recurso eletrônico] / Thais Ramos Capai.Jardim. - 2023.  
1 recurso online (98 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Marcelo Araújo Câmara.

Coorientador: Frederico de Castro Magalhães

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 93-98.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Aço - Teses. 3. Atrito - Teses.  
4. Torneamento - Teses. I. Câmara, Marcelo Araújo. II. Magalhães, Frederico de Castro. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621(043)



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

### FOLHA DE APROVAÇÃO

*“APLICABILIDADE DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DE ANEL PARA DETERMINAR O COEFICIENTE DE ATRITO NO ENSAIO DE TORNEAMENTO DO AÇO ABNT 1045”*

**THAÍS RAMOS CAPAI JARDIM**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Marcelo Araújo Câmara (Orientador – Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Frederico de Castro Magalhães (Coorientador – Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Alexandre Mendes Abrão (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), (Dr<sup>a</sup>. Bárbara Cristina Mendanha Reis (Universidade Federal de Ouro Preto/UFOP) e Dr. Gilmar Cordeiro da Silva (Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais/PUC-Minas), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **"Mestre em Engenharia Mecânica"**, na área de concentração de **"Engenharia de Manufatura e Materiais"**.

Dissertação aprovada no dia 28 de abril de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Araujo Camara, Professor do Magistério Superior**, em 02/05/2023, às 14:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Frederico de Castro Magalhaes, Professor do Magistério Superior**, em 02/05/2023, às 16:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Mendes Abrao, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 02/05/2023, às 17:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gilmar Cordeiro da Silva, Usuário Externo**, em 03/05/2023, às 15:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Bárbara Cristina Mendanha Reis, Usuária Externa**, em 03/05/2023, às 17:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2264032** e o código CRC **8EBF3606**.

---

*Dedico este trabalho ao meu irmão Diogo, por acreditar e insistir incansavelmente para iniciar esta jornada.*

## AGRADECIMENTOS

*Ao nosso Senhor Jesus Cristo, que por meio dEle fez e faz com que todas as coisas sejam possíveis.*

*Ao meu orientador Dr. Marcelo Araújo Câmara pelo acolhimento e por toda confiança em mim depositada, pelos ensinamentos e incentivos ao longo deste trabalho. Ao meu coorientador Dr. Frederico de Castro Magalhães pela dedicação e orientação.*

*Aos professores Gilmar e José Rubens pelo incentivo e apoio antes e ao longo deste trabalho.*

*Aos meus queridos amigos do laboratório da PUC-Contagem e Coração Eucarístico, principalmente ao professor Tarcísio, Marceliny, Ernane, Erberte e Edilene pelo apoio e pela ajuda na realização dos ensaios.*

*Ao Anderson Santos pela ajuda, treinamentos e o tempo e dedicação disponibilizado na realização dos ensaios e à Bárbara Mendanha por todo auxílio e ensinamento dispensado.*

*Ao Rodrigo e à DURA MAIS por me auxiliarem na fabricação das amostras.*

*Ao meu esposo Vitor, por ser a minha maior inspiração, suporte e apoio ao longo de toda a jornada.*

*Aos meus familiares, em especial à minha mãe e ao meu irmão por todo carinho e apoio que sempre recebi. E ao meu pai (In memoriam) por ser o primeiro a acreditar no meu potencial.*

*À Escola de Engenharia da UFMG, à Pontifícia Universidade Católica - campus Coração Eucarístico e campus Contagem pela infraestrutura física e intelectual disponibilizada.*

*À Oerlikon Balzers, em especial ao Rafael Silva e ao Carlito Schelb, por acreditarem no trabalho, pelo apoio e pelos revestimentos realizados para este trabalho.*

*Agradeço ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – código de financiamento 001.*

*O meu agradecimento a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para este trabalho.*

## RESUMO

O atrito na usinagem é de difícil determinação devido às pequenas áreas de interface ferramenta/cavaco e ferramenta/peça, altas temperaturas, tensões e deformações. Dessa forma, vários ensaios tribológicos foram desenvolvidos para simular as condições de corte e determinar o coeficiente de atrito como o ensaio pino-sobre-face, ensaio cilindro-sobre-face e pino-sobre-cilindro. Este trabalho compara o coeficiente de atrito entre o aço ABNT 1045 e WC-10Co revestido com AlCrN obtido por dois métodos: ensaio de torneamento e ensaio de compressão de anel. A caracterização do aço ABNT 1045 foi feita por meio de análise química, microestrutural e mecânica. A análise microestrutural do anel após a deformação no ensaio de compressão de anel observou a influência da temperatura de ensaio no deslocamento do raio neutro. A análise superficial dos anéis e das matrizes do ensaio de compressão foi realizada por meio de microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva de Raio-X (EDS) e rugosidade Ra, onde observou-se o aumento da rugosidade após o ensaio e a presença de desgaste adesivo. O ensaio de torneamento foi realizado com corte oblíquo nas velocidades de corte de 150 e 220 m/min. A aquisição dos sinais das componentes de força da usinagem por meio de um dinamômetro piezelétrico. O ensaio de compressão de anel foi realizado nas temperaturas de 200 e 400°C. Os coeficientes de atrito foram obtidos por meio de modelos matemáticos. A análise estatística do coeficiente de atrito apontou equivalência do coeficiente de atrito no ensaio de torneamento na velocidade de corte 150 m/min com o ensaio de compressão de anel à 200°C. Assim como no ensaio de torneamento na velocidade de corte 220 m/min com o ensaio de compressão de anel à 400°C.

Palavras-chave: compressão de anel; coeficiente de atrito; torneamento;

## ABSTRACT

Friction in machining is difficult to determine due to the small areas of tool/chip and tool/part interface, high temperatures, stresses and deformations. Thus, several tribological tests were developed to simulate the cutting conditions and determine the coefficient of friction, such as the pin-on-face test, cylinder-on-face test and pin-on-cylinder. This work compares the coefficient of friction between ABNT 1045 steel and WC-10Co coated with AlCrN obtained by two methods: turning test and ring compression test. The characterization of the ABNT 1045 steel was carried out through chemical, microstructural and mechanical analysis. The microstructural analysis of the ring after deformation in the ring compression test observed the influence of the test temperature on the displacement of the neutral radius. The surface analysis of the rings and matrices of the compression test was performed using optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and roughness Ra, where it was observed the increase in roughness after the test and the presence of adhesive wear. The turning test was performed with oblique cutting at cutting speeds of 150 and 220 m/min. Acquisition of machining force component signals using a piezoelectric dynamometer. The ring compression test was carried out at temperatures of 200 and 400°C. Friction coefficients were obtained using mathematical models. Statistical analysis of the coefficient of friction indicated equivalence of the coefficient of friction in the turning test at a cutting speed of 150 m/min with the ring compression test at 200°C. As well as in the turning test at cutting speed 220 m/min with the ring compression test at 400°C.

Keywords: ring compression; coefficient of friction; turning;

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação do movimento de um corpo sobre uma superfície estacionária; a) movimento de rolamento; b) movimento de deslizamento; .....	19
Figura 2.2 – Representação do desgaste abrasivo. (a) dois corpos; (b) três corpos. ....	21
Figura 2.3 – Formação de uma junção por adesão. ....	22
Figura 2.4 – Exemplo de desprendimento de partículas de material com maior dureza. ....	22
Figura 2.5 – Principais operações de torneamento .....	25
Figura 2.6 – Representação do torneamento: a) principais parâmetros de corte; b) corte ortogonal e corte oblíquo .....	26
Figura 2.7 – Principais parâmetros no corte oblíquo. ....	26
Figura 2.8 - Representação do contato entre a peça, a ferramenta de corte e o cavaco. ....	27
Figura 2.9 - Representação das zonas de aderência e escorregamento na interface de contato	28
Figura 2.10 – Modelo das zonas de aderência e escorregamento na interface entre a ferramenta e o cavaco: a) modelo com duas zonas (aderência-escorregamento); b) modelo com zona intermediária;.....	29
Figura 2.11 – Resistência à oxidação do AlCrN à 900, 1000 e 1100°C .....	32
Figura 2.12 – Dureza dos revestimentos AlTiN, AlCrN e AlCrSiWN em função da temperatura .....	33
Figura 2.13 – Revestimento AlCrN depois do ensaio de desgaste .....	34
Figura 2.14 – Coeficiente de atrito em função da velocidade de deslizamento do revestimento AlCrN.....	35
Figura 2.15 – Ensaio de compressão. a) representação dos esforços no corpo de prova; b) gráfico da tensão em função da deformação de compressão .....	36
Figura 2.16 – Representação do corpo de prova no ensaio de compressão de anel .....	37
Figura 2.17 – Raio neutro ( $R_n$ ) e a influência do atrito no diâmetro interno do anel. a) condição de baixo atrito; b) condição de atrito alto .....	37
Figura 2.18 – Representação das principais grandezas do ensaio de compressão de anel .....	38
Figura 2.19 – Comparação entre as curvas de calibração propostas pelos autores Avitzur (1964), Goetz et al. (1991) e Mirahmadi, Hamedi e Cheraghzadeh (2015) .....	40
Figura 2.20 – Coeficiente de atrito em função da rugosidade em diferentes testes .....	41
Figura 4.1 – Fluxograma do procedimento experimental.....	44

Figura 4.2 – Imagem representativa do anel: a) desenho mecânico com as dimensões; b) vista isométrica do anel.....	46
Figura 4.3 – Imagem representativa da matriz: a) desenho da matriz; b) fotografia da matriz. ....	47
Figura 4.4 – Tarugo: a) dimensões; b) comprimento destinado para teste e réplica; c) montagem no torno.....	48
Figura 4.5 – Representação da ferramenta de corte: a) vista superior; b) vista da seção transversal; c) imagem da ferramenta revestida com AlCrN (dimensões em milímetros).....	49
Figura 4.6 – Esquema elétrico do sistema de aquecimento.....	51
Figura 4.7 – Espaçamento mínimo para o ensaio de microdureza Vickers segundo a norma ASTM E384-05a. ....	53
Figura 4.8 – Microdureza Vickers: a) amostra comprimida à 200°C; b) amostra comprimida à 400°C;.....	53
Figura 4.9 – Montagem para o ensaio de torneamento.....	54
Figura 4.10 - Desenho da tampa: a) vista frontal; b) vista superior; c) visão isométrica da tampa. ....	57
Figura 4.11 - Desenho da base: a) vista superior; b) vista do corte; c) visão isométrica da base. ....	57
Figura 4.12 – Montagem do dispositivo, matrizes e anel: a) vista explodida; b) montagem antes do ensaio; c) montagem após o ensaio. ....	58
Figura 4.13 – Resistência cerâmica tipo coleira.....	59
Figura 4.14 – Sistema de aquecimento montado sobre a prensa. ....	61
Figura 4.15 - Detalhes do sistema de aquecimento: a) vista geral; b) sistema isolado. ....	61
Figura 5.1 – Microestrutura do aço ABNT 1045 antes dos ensaios: a) 50x; b) 200x; c) 500x. ....	65
Figura 5.2 – Microestrutura do aço ABNT 1045 após a compressão à 200°C: a) 200x; b) 500x; c) 1000x.....	66
Figura 5.3 – Microestrutura do aço ABNT 1045 após a compressão à 400°C: a) 200x; b) 500x; c) 1000x.....	66
Figura 5.4– Seção transversal do anel deformado à 200°C.....	68
Figura 5.5 – Seção transversal do anel deformado à 400° .....	68
Figura 5.6 – Endentações na seção transversal do anel.....	69
Figura 5.7 – Desenvolvimento da área de contato do anel durante a compressão .....	72

Figura 5.8 – Imagem de MO do anel conformado à 200°C: a) região próxima ao diâmetro interno; b) região próxima ao diâmetro externo .....	72
Figura 5.9 – Imagem de MO do anel conformado à 400°C: a) região próxima ao diâmetro interno; b) região próxima ao diâmetro externo. ....	73
Figura 5.10 – Superfície de contato externo e interno do anel .....	73
Figura 5.11 – Imagens de MEV da superfície do anel comprimido à 200°C: a) região mais externa do anel; b) região mais interna do anel. ....	74
Figura 5.12 – Imagens de MEV da superfície do anel comprimido à 400°C: a) região mais externa do anel; b) região mais interna do anel. ....	75
Figura 5.13 – Análise superficial do anel comprimido à 200°C: a) imagem via MEV; b) resultado EDS do espectro 83; c) resultado EDS do espectro 85. ....	76
Figura 5.14 – Análise superficial do anel comprimido à 400°C: a) imagem via MEV; b) resultado EDS do espectro 80; c) resultado EDS do espectro 82. ....	76
Figura 5.15 – Matriz após o ensaio de compressão à 200°C: a) 50x ampliação; b) 1000x de ampliação. ....	79
Figura 5.16 – Matriz após o ensaio de compressão à 400°C: a) 50x ampliação; b) 1000x de ampliação. ....	79
Figura 5.17 – Imagens da superfície da matriz via MEV: a) antes do ensaio; b) após o ensaio; .....	80
Figura 5.18 – Análise superficial da matriz antes do ensaio: a) imagem via MEV; b) resultado EDS do espectro 22; c) resultado EDS do espectro 23. ....	80
Figura 5.19 – Análise superficial da matriz comprimida à 200°C: a) imagem via MEV; b) resultado EDS do espectro 77; c) resultado EDS do espectro 75. ....	81
Figura 5.20 – Análise superficial da matriz comprimida à 200°C: a) imagem via MEV; b) resultado EDS do espectro 77; c) resultado EDS do espectro 75. ....	82
Figura 5.21 – Análise superficial do inserto antes do ensaio de torneamento. ....	83
Figura 5.22 - Análise superficial do inserto antes do ensaio de torneamento: a) imagem via MEV; b) resultado EDS do espectro 29 .....	84
Figura 5.23 – Análise superficial do inserto após o ensaio de torneamento: a) imagem via MEV; b) resultado EDS do espectro 5; c) resultado EDS do espectro 6. ....	84
Figura 5.24 – Teste de normalidade para o coeficiente de atrito no ensaio de torneamento...	88
Figura 5.25 – Teste de normalidade para o coeficiente de atrito no ensaio de torneamento...	88

Figura 5.26 – Teste de Levene para a igualdade de variâncias para os coeficientes de atrito dos ensaios de compressão e ensaios de torneamento ..... 89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Modelos de coeficiente de atrito.....	30
Tabela 4.1 – Composição química do aço ABNT 1045 .....	45
Tabela 4.2 – Propriedades químicas e físicas do WC-10Co.....	46
Tabela 4.3 – Parâmetros segundo trabalhos acadêmicos.....	55
Tabela 4.4 – Parâmetros de corte.....	55
Tabela 5.1 - Composição do aço ABNT 1045 adquirido (% peso).....	64
Tabela 5.2 – Dureza Vickers do aço ABNT 1045 antes e após o ensaio de compressão de anel. .....	69
Tabela 5.3 – Perfil de microdureza da seção transversal do anel .....	69
Tabela 5.4 – Rugosidade Ra da face dos anéis antes e depois do ensaio de compressão .....	70
Tabela 5.5 – Rugosidade Ra dos anéis antes e depois do processo de compressão .....	71
Tabela 5.6 – Rugosidade Ra dos anéis em razão da temperatura de ensaio de compressão de anel .....	71
Tabela 5.7 – Rugosidade Ra da face das matrizes antes e depois do ensaio de compressão de anel .....	77
Tabela 5.8 – Rugosidade Ra das matrizes antes e depois do ensaio de compressão de anel ...	78
Tabela 5.9 – Rugosidade Ra das matrizes em razão da temperatura de ensaio de compressão de anel .....	78
Tabela 5.10 – Tabela de força de usinagem do ensaio de torneamento .....	85
Tabela 5.11 – Coeficiente de atrito do ensaio de torneamento.....	86
Tabela 5.12 – Medidas dos anéis após a deformação.....	86
Tabela 5.13 – Resultado do coeficiente de atrito do ensaio de compressão de anel .....	87
Tabela 5.14 – Teste t para as velocidades de corte no ensaio de torneamento.....	89
Tabela 5.15 – Teste t para as temperaturas de ensaio no ensaio de compressão.....	90
Tabela 5.16 – Teste t para o ensaio de torneamento a 150 m/min e ensaio de compressão de anel à 200°C .....	90
Tabela 5.17 – Teste t para o ensaio de torneamento a 150 m/min e ensaio de compressão de anel à 400°C .....	90
Tabela 5.18 – Teste t para o ensaio de torneamento a 220 m/min e ensaio de compressão de anel à 200°C .....	91

Tabela 5.19 – Teste t para o ensaio de torneamento a 220 m/min e ensaio de compressão de anel à 400°C .....	91
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	Instituto Americano do Ferro e do Aço ( <i>American Institute for iron and Steel</i> )
ASTM	Sociedade Americana para Testes e Materiais ( <i>American Society for Testing and Materials</i> )
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raio-X ( <i>Energy dispersive X-ray spectroscopy</i> )
HV	Dureza Vickers
LAMAT	Laboratórios de Análises em Materiais
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura ( <i>Scanning Electron Microscopy</i> )
MO	Microscopia Óptica
PUC-MG	Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
PVD	Deposição Física de Vapor ( <i>Physical Vapour Deposition</i> )
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

## LISTA DE SÍMBOLOS E COMPOSTOS QUÍMICOS

$\text{Al}_2\text{O}_3$	Óxido de alumínio
$\text{AlCrN}$	Nitreto de alumínio cromo
$\text{AlCrSiWN}$	Nitreto de alumínio cromo silício e tungstênio
$\text{AlTiN}$	Nitreto de alumínio titânio
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	Óxido de cromo
$\text{CrAlN}$	Nitreto de cromo alumínio
$\text{CrCN}$	Carbonitreto de cromo
$\text{CrN}$	Nitreto de cromo
$\text{FeO}$	Óxido de ferro
$\text{Si}$	Silício
$\text{SiC}$	Carboneto de silício
$\text{TiAlN}$	Nitreto de titânio alumínio
$\text{TiCN}$	Carbonitreto de titânio
$\text{TiAlCrN}$	Nitreto de titânio alumínio e cromo
$\text{TiN}$	Nitreto de titânio
$\text{W}$	Tungstênio
$\text{WC-10Co}$	Metal duro com 10% de cobalto

## NOMECLATURA

### Letras latinas e gregas

$\varepsilon_r$	Raio de ponta	[graus]
$\%D$	Varição do diâmetro interno	
$\%T$	Varição da espessura	
$\Delta R_i$	Varição do raio interno	[mm]
$\Delta R_o$	Varição do raio externo	[mm]
$\mu$	Coefficiente de atrito	
$A$	Área de contato	[m <sup>2</sup> ]
$a_p$	Profundidade de usinagem	[mm]
$c_{aço}$	Calor específico do aço	[J/g.°C]
$D$	Diâmetro interno final	[mm]
$d$	Média das diagonais	[μm]
$D_i$	Diâmetro interno inicial	[mm]
$D_o$	Diâmetro inicial	[mm]
$F$	Força de atrito	[N]
$f$	Avanço	[mm.rev <sup>-1</sup> ]
$F_c$	Força de corte	[N]
$F_f$	Força de avanço	[N]
$F_p$	Força passiva	[N]
$F_u$	Força de usinagem	[N]
$I$	Corrente elétrica	[A]
$L_o$	Comprimento inicial	[mm]
$m$	Constante do fator de atrito	
$m_{conjunto}$	Massa do conjunto	[g]
$P$	Carga aplicada	[kgf]
$P_r$	Potência requerida	[W]
$Q$	Quantidade de calor	[J]
$Ra$	Desvio aritmético médio	[μm]
$R_i$	Raio interno final	[mm]
$R_n$	Raio neutro	[mm]
$R_o$	Raio externo final	[mm]

$T$	Espessura final	[mm]
$t$	Tempo	[s]
$T_{amb}$	Temperatura ambiente	[°C]
$T_i$	Espessura inicial	[mm]
$T_{máx}$	Temperatura máxima	[°C]
$V$	Tensão elétrica	[V]
$v_c$	Velocidade de corte	[m.min <sup>-1</sup> ]
$W$	Força normal	[N]
$\gamma_o$	Ângulo de saída	[graus]
$\lambda_s$	Ângulo de inclinação da ferramenta	[graus]
$\sigma_n$	Tensão normal	[MPa]
$\tau$	Tensão de cisalhamento	[MPa]
$\chi_r$	Ângulo de posição da ferramenta	[graus]

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1 Hipótese e objetivos .....</b>	<b>18</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1 Atrito .....</b>	<b>19</b>
2.1.1 <i>Desgaste</i> .....	20
2.1.2 <i>Desgaste abrasivo</i> .....	20
2.1.3 <i>Desgaste adesivo</i> .....	21
2.1.4 <i>Desgaste por difusão</i> .....	23
2.1.5 <i>Desgaste por oxidação</i> .....	23
<b>2.2 Usinagem .....</b>	<b>24</b>
<b>2.3 Revestimento AlCrN.....</b>	<b>31</b>
<b>2.4 Ensaio de compressão de anel.....</b>	<b>35</b>
<b>3. CONSIDERAÇÕES PARCIAIS .....</b>	<b>42</b>
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>43</b>
<b>4.1 Materiais .....</b>	<b>45</b>
4.1.1 <i>Corpos de prova</i> .....	45
4.1.1.1 Anel.....	45
4.1.1.2 Matriz de compressão de anel.....	46
4.1.1.3 Barra cilíndrica de aço ABNT 1045 .....	47
4.1.2 <i>Ferramenta de corte</i> .....	48
<b>4.2 Equipamentos.....</b>	<b>49</b>
4.2.1 <i>Análise da composição química</i> .....	49
4.2.2 <i>Análise microestrutural</i> .....	49
4.2.3 <i>Dureza</i> .....	50
4.2.4 <i>Análise superficial</i> .....	50

4.2.5 Ensaio de torneamento .....	50
4.2.6 Ensaio de compressão de anel.....	50
<b>4.3 Métodos.....</b>	<b>51</b>
4.3.1 Análise da composição química .....	51
4.3.2 Caracterização microestrutural .....	52
4.3.3 Dureza.....	52
4.3.4 Análise superficial .....	53
4.3.5 Ensaio de torneamento .....	54
4.3.5.1 Montagem .....	54
4.3.5.2 Aquisição das componentes da força de usinagem.....	56
4.3.6 Ensaio de compressão de anel.....	56
4.3.6.1 Dispositivo de compressão de anel.....	56
4.3.6.2 Projeto do sistema de aquecimento.....	58
4.3.7 Determinação do coeficiente de atrito .....	62
4.3.7.1 Ensaio de torneamento.....	62
4.3.7.2 Ensaio de compressão de anel .....	62
4.3.8 Análise estatística .....	62
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>64</b>
<b>5.1 Composição química.....</b>	<b>64</b>
<b>5.2 Análise microestrutural.....</b>	<b>64</b>
<b>5.3 Dureza .....</b>	<b>69</b>
<b>5.4 Análise superficial.....</b>	<b>70</b>
5.4.1 Anel.....	70
5.4.2 Matriz.....	77
5.4.3 Inserto.....	82
<b>5.5 Coeficiente de atrito.....</b>	<b>85</b>
5.5.1 Ensaio de torneamento .....	85

5.5.2 <i>Compressão de anel</i> .....	86
5.6.3 <i>Análise estatística</i> .....	87
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	<b>92</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>93</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A usinagem é um dos principais processos na indústria mecânica, onde mais de 15% dos componentes mecânicos são feitos por meio de operações de corte (LIANG *et al.*, 2022; JAWAHIR *et al.*, 2011). Devido à sua importância, essa tecnologia do corte tem sido desenvolvida para aumentar a precisão, eficiência, alto desempenho dos componentes e ser ambientalmente sustentável, parte desse desenvolvimento pode ser atribuído pelo avanço da teoria e aplicação do estudo da tribologia no corte (LIANG *et al.*, 2022).

Analisar o comportamento do atrito durante a usinagem é complexo devido às extremas condições, como a alta temperatura, grandes deformações e taxas de deformações, complexas interações e contato do tipo aderência-escorregamento entre a ferramenta/cavaco e ferramenta/peça. Logo, a compreensão e determinação do comportamento do atrito e de seu coeficiente durante o corte é limitado e difícil. Ao longo dos anos, diversos ensaios tribológicos experimentais foram desenvolvidos a fim de simular a condição de corte e determinar o coeficiente de atrito, como o ensaio pino-sobre-face, ensaio cilindro-sobre-face e pino-sobre-cilindro, porém estes métodos ainda são limitados devido a aplicabilidade (LIANG *et al.*, 2022; CAKIR *et al.*, 2018; VANDANA e SUNDARAM, 2018; MAHATO *et al.*, 2017). A fim de reduzir custos, modelos matemáticos e empíricos têm sido desenvolvidos para otimizar os processos de corte, como o ensaio pino-sobre-face, ensaio cilindro-sobre-face e pino-sobre-cilindro (GRZESIK, 2017; LIANG *et al.*, 2022).

O ensaio de compressão de anel é um teste tribológico que determina o coeficiente de atrito por meio da deformação plástica do anel, que pode ser realizado à frio, à morno e à quente. Neste método não é necessário conhecer as propriedades intrínsecas do material estudado, dependendo somente das mudanças físicas do anel após o teste. Este ensaio é comumente utilizado em aplicações de processos de conformação, uma vez que consegue simular as condições de alta temperatura e grandes deformações (SOARES, 2013; MALE e DePIERRE, 1970; RAO e SIVARAM, 1993; SRIVASTAVA, SHRIVASTAVA e MISHRA, 2019). Com esta premissa, pode ser possível utilizar o ensaio de compressão de anel para determinar o coeficiente de atrito no torneamento.

## 1.1 Hipótese e objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal verificar e validar a hipótese de que o coeficiente de atrito obtido pelo ensaio de compressão em duas temperaturas tem resultado equivalente ao coeficiente de atrito obtido no ensaio de torneamento. Assim, é necessário determinar o coeficiente de atrito entre o aço ABNT 1045 e o metal duro (WC-10Co) com revestimento de AlCrN, no ensaio de usinagem e no ensaio de compressão de anel. E com isso, é possível comparar e os resultados encontrados nos dois métodos de ensaio por meio de análise estatística.

Para validar a hipótese é necessário estabelecer os seguintes objetivos específicos:

1. Avaliar o efeito do atrito nas amostras por meio da análise superficial do anel ABNT 1045, da matriz e do inserto de metal duro (WC-10Co) com revestimento de AlCrN, com auxílio de imagens de microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva de Raio-X (EDS) e rugosidade.
2. Realizar o ensaio de torneamento, empregando duas velocidades de corte distintas, a fim de adquirir as forças de usinagem por meio de um dinamômetro piezelétrico e calcular o coeficiente de atrito por meio de modelo matemático.
3. Realizar o ensaio de compressão de anel, empregando duas temperaturas distintas, adquirir as dimensões dos anéis deformados e calcular o coeficiente de atrito por meio de modelo matemático.
4. Comparar por meio de análise estatística os coeficientes de atrito obtidos do ensaio de torneamento e ensaio de compressão de anel.

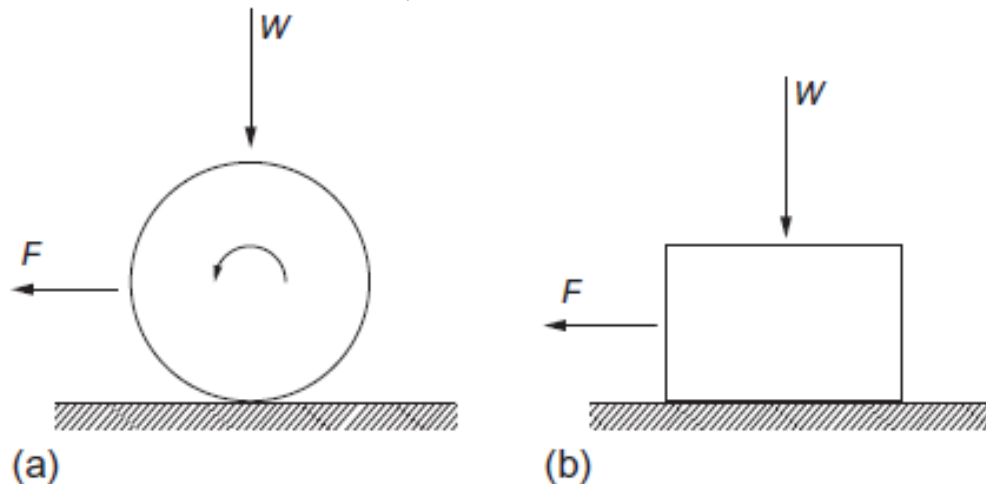
## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda a base teórica dos quatro temas principais deste trabalho, sendo o atrito, a usinagem, o revestimento de AlCrN e a compressão de anel.

### 2.1 Atrito

Por definição, o atrito é a resistência ao movimento presente quando uma superfície sólida é movida tangencialmente sobre outra superfície sólida (RABINOWICZ, 1995). Pode-se observar na Figura 2.1 as forças presentes durante o movimento de rolamento e deslizamento de um objeto sobre uma superfície. Onde, a força de atrito ( $F$ ) é a força tangencial necessária para que o objeto se mova e a força normal ( $W$ ) atuante sobre o objeto (HUTCHING e SHIPWAY, 2017).

Figura 2.1 – Representação do movimento de um corpo sobre uma superfície estacionária; a) movimento de rolamento; b) movimento de deslizamento;



Fonte: Hutching e Shipway (2017)

O coeficiente de atrito ( $\mu$ ) é a razão entre a força de atrito ( $F$ ) e a força normal ( $W$ ), como apresentado na Equação 2.1:

$$\mu = \frac{F}{W} \quad (2.1)$$

Se a área de contato entre o objeto e a superfície for considerada, o coeficiente de atrito pode ser expresso em função da tensão de cisalhamento e a tensão normal, como na Equação 2.2:

$$\mu = \frac{F/A}{W/A} = \frac{\tau}{\sigma_n} \quad (2.2)$$

Onde  $A$  é a área de contato entre o objeto e a superfície,  $\tau$  é a tensão de cisalhamento de atrito e  $\sigma_n$  é a tensão normal na interface do objeto e a superfície (HUTCHING e SHIPWAY, 2017).

### 2.1.1 Desgaste

Com o atrito surge o desgaste das superfícies que estão em contato, o qual se caracteriza como a perda progressiva de material por meio de uma ação química ou mecânica. Na usinagem, é inerente que haja atrito uma vez que existe o contato e o avanço da ferramenta sobre peça a ser usinada e do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta. O desgaste da ferramenta ocorre de maneira contínua e progressiva, resultando na mudança da geometria da aresta de corte a tal ponto que seja necessária a substituição da ferramenta. Por si só, os custos das ferramentas equivalem a uma pequena parcela do custo de fabricação, porém as várias trocas de ferramentas aumentam o tempo de paradas da máquina, resultando em custos adicionais e redução na produtividade (MACHADO *et al.*, 2009; HUTCHING e SHIPWAY, 2017; LIANG *et al.*, 2022; HE, LIU e YAN, 2012).

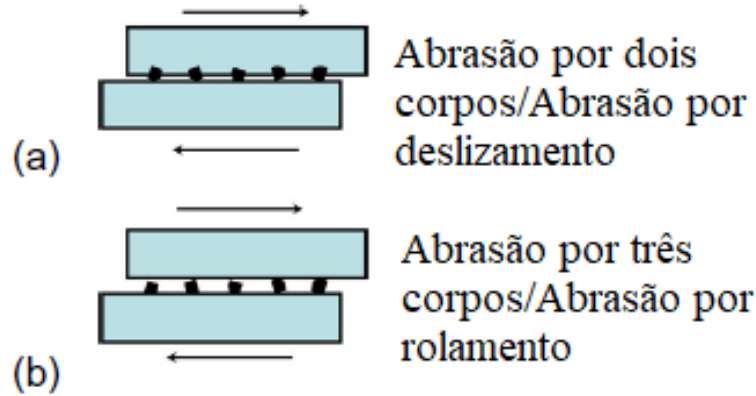
Nas interfaces ferramenta/peça e ferramenta/cavaco, a temperatura e as tensões são elevadas e tais fatores propiciam o aparecimento de um ou mais mecanismos de desgaste (MACHADO *et al.*, 2009; LIANG *et al.*, 2022; HE, LIU e YAN, 2012). A abrasão, adesão, difusão e oxidação são mecanismos de desgaste que podem ocorrer durante a usinagem.

### 2.1.2 Desgaste abrasivo

O desgaste abrasivo ocorre quando uma superfície com protuberâncias duras desliza sobre uma superfície macia e remove material. Com este contato, a superfície dura e rugosa promove formação de riscos e sulcos na superfície do material macio. Desta maneira, forma-se partículas de desgaste soltas com o material arrancado da superfície macia. O desgaste abrasivo também ocorre quando partículas duras e soltas estão entre duas superfícies e são forçadas contra as superfícies em movimento relativo. Neste caso são as partículas duras que promovem a formação de riscos e sulcos em ambas as superfícies. Estes dois casos caracterizam duas

formas de desgaste abrasivo conhecidos como desgaste de dois corpos e desgaste de três corpos, respectivamente (HUTCHING e SHIPWAY, 2017; RABINOWICZ, 1995). O desgaste abrasivo de dois e três corpos está representado esquematicamente na figura 2.2.

Figura 2.2 – Representação do desgaste abrasivo. (a) dois corpos; (b) três corpos.



Fonte: Hutching e Shipway (2017)

Definir o tipo de desgaste abrasivo não depende somente se as partículas duras estão aderidas ou soltas sobre a superfície, depende também do movimento relativo das partículas. Se uma das superfícies for composta de um material que contém partículas duras, durante o movimento as partículas duras estarão fixas a superfície pertencente e deslizará sobre a outra superfície, o que caracteriza um desgaste de dois corpos. Se eventualmente estas partículas duras se desprenderem da superfície de origem, poderão então rolar livremente sobre as duas superfícies, o que torna um desgaste de três corpos. Ou ainda, as partículas duras soltas podem se alojar em um sulco de uma das superfícies e assim deslizar sobre a outra superfície, o que torna um desgaste de dois corpos. Desta maneira, pode-se classificar o tipo de desgaste abrasivo pelo movimento das partículas duras, sendo desgaste por deslizamento ou desgaste por rolamento (HUTCHING e SHIPWAY, 2017; RABINOWICZ, 1995).

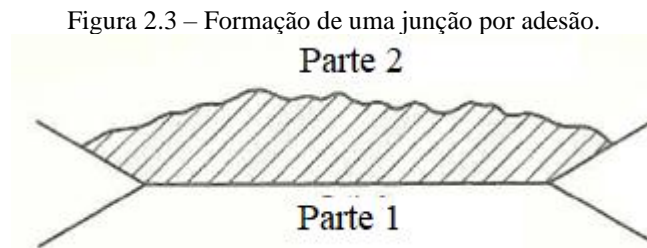
A taxa de desgaste em um desgaste por abrasão é influenciada diretamente pela dureza e o formato das partículas. Quanto maior a dureza das partículas em relação a dureza da superfície, maior será a taxa de desgaste. Quanto ao formato, partículas angulares provocam mais desgaste abrasivo do que partículas arredondadas (HUTCHING e SHIPWAY, 2017).

### 2.1.3 Desgaste adesivo

A adesão ocorre quando duas superfícies estão em contato, seja em um deslizamento ou simplesmente pressionadas uma contra outra, e uma parte do material de uma das superfícies é arrancado e aderido à outra. Durante o deslizamento, estes fragmentos aderidos podem ser

aderidos novamente à superfície de origem ou podem ser arrancados e formar partículas de desgastes soltas (RABINOWICZ, 1995).

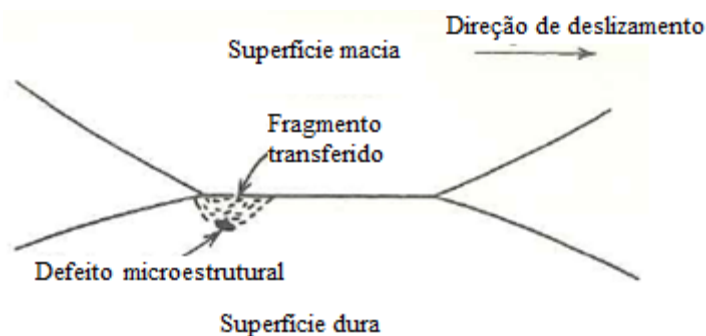
A adesão depende das forças atrativas intrínsecas dos átomos que constituem as duas superfícies em contato. Se as forças atrativas forem grandes o suficiente, a interação entre os átomos será tal que provocará a junção da interface dos dois materiais. Quando o contato é interrompido, seja por uma força tangencial ou normal, a ruptura da junção poderá ocorrer não na interface original, mas no interior de um dos materiais. Isso ocorrerá se a força necessária para romper a junção for maior que a força necessária para romper uma superfície contínua dentro de um dos materiais, desta forma a ruptura ocorrerá ao longo da superfície deste material, conforme pode ser observado na Figura 2.3 (RABINOWICZ, 1995).



Fonte: Rabinowicz (1995)

O fragmento da adesão será desprendido da superfície constituída pelo material com a menor resistência mecânica, a maioria dos casos acontece no material mais macio. Porém, eventuais fragmentos podem ser oriundos do material mais duro. Quando a junção ocorre em uma região onde o material de maior resistência mecânica possui um defeito microestrutural, essa junção pode superar a resistência desse material provocando o desprendimento de partículas duras, conforme ilustrado na Figura 2.4 (RABINOWICZ, 1995).

Figura 2.4 – Exemplo de desprendimento de partículas de material com maior dureza.



Fonte: Rabinowicz (1995)

Os fragmentos do material mais macio podem ser deformados durante o contato sucessivo e assim aumentar a resistência mecânica destes fragmentos. Desta maneira, o desgaste por adesão pode formar fragmentos duros, tanto do material mais macio quanto do material mais duro. Tais fragmentos duros podem servir como um mecanismo de desgaste abrasivo, para superfícies que estão em contato e em movimento relativo (RODRIGUES, 2005; LIANG *et al.*, 2022; HE, LIU e YAN, 2012).

#### *2.1.4 Desgaste por difusão*

O desgaste por difusão é a perda de material devido à migração de átomos entre superfícies em contato com movimento relativo. Os átomos se movem na direção da menor concentração, que causa perda de propriedades na superfície que cede os átomos. Dois fatores são fundamentais para que ocorra a difusão: altas temperaturas e afinidade química dos materiais que compõe as superfícies. A temperatura é o principal fator, pois mesmo para materiais com pouca afinidade química, as altas temperaturas aumentam a velocidade de difusão exponencialmente (TRENT e WRIGHT, 2000; RABINOWICZ, 1995).

Durante a usinagem o contato da ferramenta com a peça favorece o surgimento do desgaste por difusão na superfície de saída devido ao intenso contato peça/ferramenta e a alta temperatura. O desgaste por difusão na usinagem pode ser maléfico, seja pelos átomos da ferramenta que migram para a peça ou cavaco, o que torna o material da ferramenta empobrecido, seja pelos átomos da peça que migram para a ferramenta, que pode contaminar a ferramenta e até mesmo gerar compostos indesejados (LIANG *et al.*, 2022; HE, LIU e YAN, 2012).

#### *2.1.5 Desgaste por oxidação*

O desgaste por oxidação se caracteriza por uma reação química onde o oxigênio se combina com outros elementos, formando óxidos e assim provoca a corrosão do material. Os metais, com exceção do ouro, são termodinamicamente instáveis quando expostos ao ar e em temperatura ambiente, fazendo com que as superfícies expostas possuam uma fina camada de óxido (HUTCHING e SHIPWAY, 2017). Algumas condições podem aumentar expressivamente a taxa do desgaste por oxidação, principalmente quando há uma combinação de outros mecanismos de desgaste. Como, por exemplo, quando a camada de óxido é

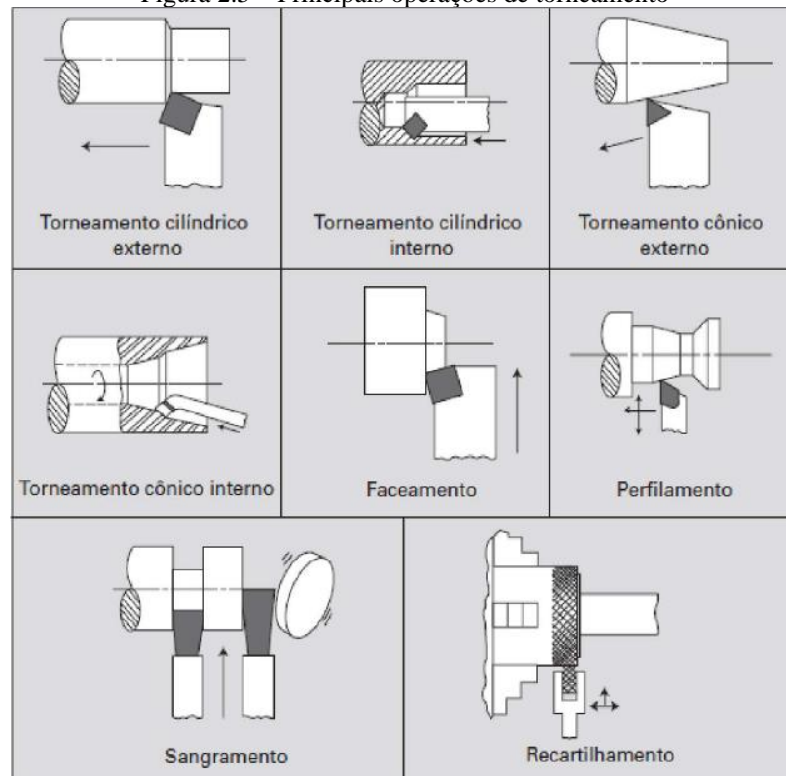
frequentemente arrancada por meio de um processo de desgaste abrasivo, à medida que a camada de óxido é arrancada o material exposto recentemente reage com o oxigênio disponível formando uma nova camada. O desgaste por difusão também pode aumentar a taxa de desgaste oxidativo, uma vez que a elevação da temperatura facilita a difusão por meio das camadas de óxido, permitindo o aumento da espessura do filme de óxido (HUTCHING e SHIPWAY, 2017; LIANG *et al.*, 2022; HE, LIU e YAN, 2012).

Durante a usinagem, as superfícies de saída e de folga da ferramenta são as mais afetadas por esse tipo de desgaste, seja em um corte a seco ou com fluido lubrificante. Geralmente é formada uma fina camada de óxido de ferro sobre essas superfícies e que em estágios iniciais age como um lubrificante diminuindo o desgaste por adesão. À medida que a espessura da camada de óxido aumenta, o risco de fratura dessa camada também cresce, podendo levar a danos permanentes a ferramenta (HUTCHING e SHIPWAY, 2017; LIANG *et al.*, 2022; HE, LIU e YAN, 2012).

## **2.2 Usinagem**

As operações de usinagem pertencem a uma grande classe de operações dos metais. A usinagem consiste em dar forma, dimensões e/ou acabamento a uma peça (FERRARESI, 1970; MACHADO *et al.*, 2009). Para isso, seja qual for a finalidade, todo processo de usinagem ocorre por meio da geração de cavaco (FERRARESI, 1970). O cavaco é a porção de material que é retirado da peça por meio da ação da ferramenta de corte. Segundo Ferraresi (1969), o torneamento é um processo mecânico de usinagem que consiste na obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. O corte acontece quando a peça gira em torno do eixo principal da máquina e a ferramenta de corte realiza os movimentos de avanço longitudinal e/ou transversal (FERRARESI, 1970; MACHADO *et al.*, 2009). Operações de torneamento são ilustradas na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Principais operações de torneamento

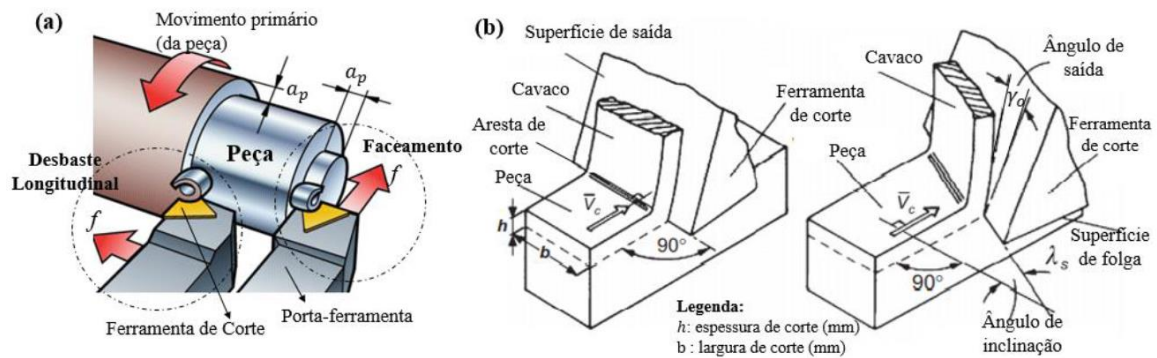


Fonte: Machado *et al.* (2009)

No torneamento, existem três parâmetros de corte fundamentais para que ocorra a remoção efetiva do cavaco, os quais estes são: velocidade de corte ( $v_c$ ), avanço ( $f$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ). A velocidade de corte é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, na direção e no sentido de corte (MACHADO *et al.*, 2009). O avanço é o percurso que a ferramenta avança a cada volta. A profundidade de corte é o quanto a ferramenta de corte penetra na peça, sendo medida perpendicularmente ao plano de trabalho (FERRARESI, 1970).

Conhecer a força que atua na cunha cortante da ferramenta durante o corte é fundamental para estimar a potência necessária da máquina, a força em que os elementos da máquina e a ferramenta estão submetidos, além vida útil da ferramenta de corte, uma vez que a força atuante na usinagem tem forte relação com o desgaste da ferramenta. Tal força, conhecida como força de usinagem ( $F_u$ ) atua no corte oblíquo, o qual ocorre no espaço tridimensional, onde a grande parte das operações de usinagem são feitas. O corte ortogonal é um modelo bidimensional onde as forças atuam somente no plano de trabalho (MACHADO *et al.*, 2009). Conforme ilustrado na Figura 2.6.

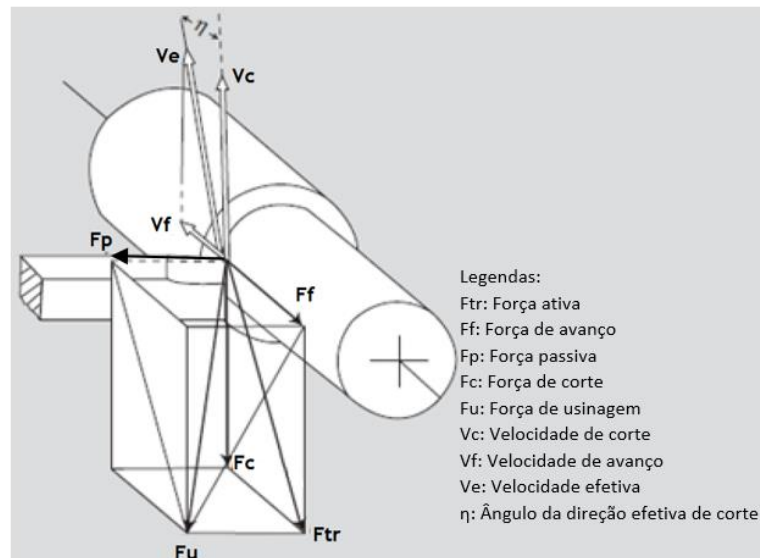
Figura 2.6 – Representação do torneamento: a) principais parâmetros de corte; b) corte ortogonal e corte oblíquo



Fonte: Reis (2021)

Ferraresi (1970) e Machado *et al.* (2009) informam que a força de usinagem ( $F_u$ ) pode ser decomposta basicamente em três componentes: força de corte ( $F_c$ ), força de avanço ( $F_f$ ) e força passiva ( $F_p$ ), conforme a Figura 2.7. A força de corte ( $F_c$ ) é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte dada pela velocidade de corte. A força de avanço ( $F_f$ ) é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de avanço dada pela velocidade de avanço. E por fim, a força passiva ( $F_p$ ) é a projeção da força de usinagem ( $F_u$ ) perpendicular ao plano de trabalho.

Figura 2.7 – Principais parâmetros no corte oblíquo.

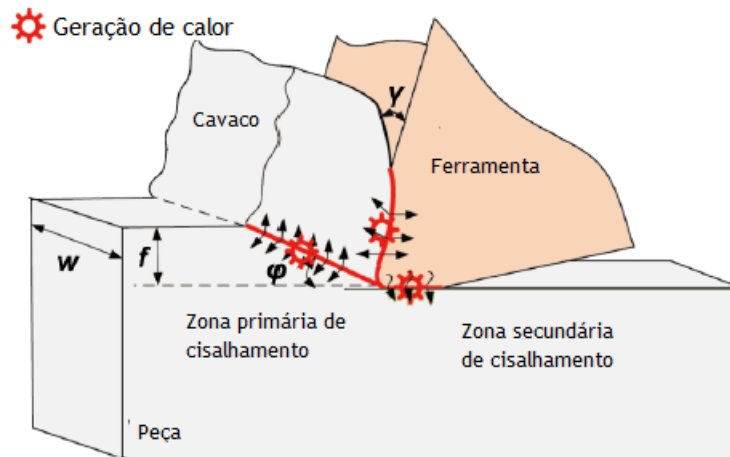


Fonte: adaptado de Machado *et al.* (2009)

Para a formação do cavaco inicialmente ocorre o recalque, onde a cunha cortante da ferramenta penetra na peça e uma parte do material da peça é pressionada contra a superfície de saída da ferramenta. Com isso, o material inicialmente deforma elasticamente e o aumento

progressivo do estado de tensões (compressão, tração e cisalhamento) acarreta a deformação plástica e consequentemente a ruptura. Com a ruptura, ocorre a formação e a propagação de trincas, durante o corte esse processo de rupturas e trincas é dinâmico e caracteriza a região denominada como zona primária de cisalhamento. Assim, dependendo da combinação de avanço, velocidade de corte e as propriedades do material da peça, o segmento recém rompido pode permanecer unido ao cavaco recém-formado, o que forma cavacos contínuos. E por fim, devido ao movimento relativo entre ferramenta e a peça, o cavaco escorrega sobre a superfície de saída da ferramenta, este fenômeno gera uma zona de cisalhamento secundário, conforme a Figura 2.8 (MACHADO *et al.*, 2009).

Figura 2.8 - Representação do contato entre a peça, a ferramenta de corte e o cavaco.



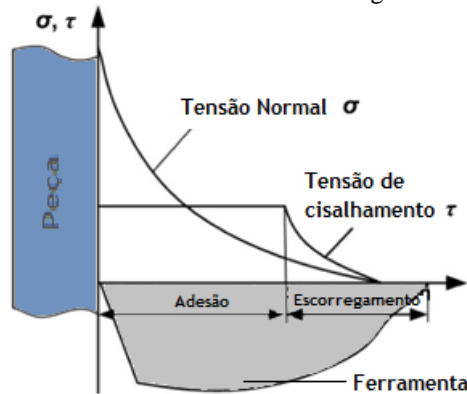
Fonte: adaptado de Liang *et al.* (2022) e Liang *et al.* (2020)

O contato entre a peça, o cavaco e a ferramenta durante a operação de corte inevitavelmente resultam em um intenso atrito na interface. Com isso, provoca efeitos termomecânicos na região de contato e alteram a integridade das superfícies, o que provoca diversos mecanismos de desgaste, reações químicas, alterações na topografia indesejadas e alterações das propriedades físicas e mecânicas (HE, LIU e YAN, 2012; LIANG, LIU e WANG, 2019).

Na ferramenta de corte, a interface de contato com o cavaco pode ser dividida em duas zonas: a zona de aderência e a zona de escorregamento. O atrito presente nessa interface é muito complexo devido às altas cargas atuantes em uma área restrita. Durante o corte, a tensão normal é máxima na extremidade da aresta e decai exponencialmente até no ponto onde o cavaco perde contato com a superfície de saída da ferramenta. A tensão cisalhante é constante e começa a

decair exponencialmente a partir da zona de escorregamento, conforme ilustrado na Figura 2.9 (HE, LIU e YAN, 2012; LIANG, LIU e WANG, 2019).

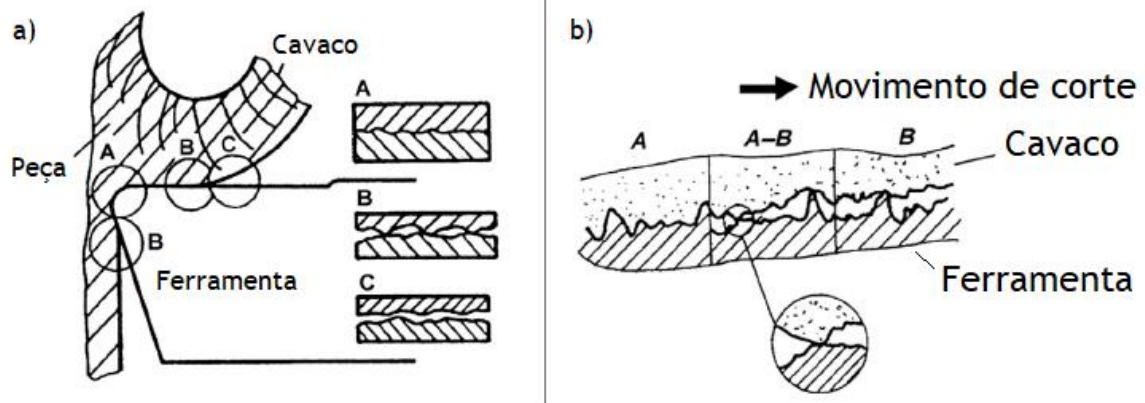
Figura 2.9 - Representação das zonas de aderência e escorregamento na interface de contato



Fonte: adaptado e traduzido de Liang *et al.* (2022)

Na zona de aderência a força normal e a temperatura são tão altas que deformam plasticamente o material da peça (por ser menos resistente que a ferramenta de corte) até que a área real de contato seja capaz de suportar a força aplicada concomitante com ligações atômicas na interface ocasionando a aderência do cavaco/ferramenta, o que pode levar que a área de contato real se torne igual a área de contato aparente. Com isso, o cavaco recém-formado desliza sobre a superfície de saída da ferramenta até o final da zona de escorregamento provocando um atrito por abrasão. Na zona de escorregamento a área de contato real é muito menor que a área de contato aparente uma vez que as tensões normais são significativamente menores e com menor possibilidade de ligações químicas fortes entre o cavaco e a ferramenta (LIANG *et al.*, 2022; HE, LIU e YAN, 2012; LIANG, LIU e WANG, 2019; LIANG *et al.*, 2020). Alguns autores como Grzesik (2017) e Zhang *et al.* (2016), sugerem uma zona intermediária entre a zona de aderência e escorregamento. Esta zona de transição possui uma atuação combinada do atrito por adesão e abrasão. Na Figura 2.10 observa-se o contato na interface entre o cavaco e a ferramenta de corte.

Figura 2.10 – Modelo das zonas de aderência e escorregamento na interface entre a ferramenta e o cavaco: a) modelo com duas zonas (aderência-escorregamento); b) modelo com zona intermediária;



Fonte: adaptado de Grzesik (2017)

Determinar o coeficiente de atrito por meio das forças de usinagem foi o objeto de estudo de Merchant (1945). No estudo realizado, um modelo matemático foi proposto baseando-se na força de corte, na força de avanço e o ângulo de saída de um torneamento com corte ortogonal. O modelo é uma simplificação e distante das condições reais de usinagem, pois analisa apenas a força normal e tangencial que atuam na superfície de saída da ferramenta como influentes no coeficiente de atrito. Albrecht (1960) sugeriu um modelo baseado no proposto por Merchant (1945) mas considerando também a profundidade de corte. O modelo matemático proposto por Grzesik, Rech e Zak (2014), considera um corte oblíquo e as forças de corte ( $F_c$ ), avanço ( $F_f$ ) e passiva ( $F_p$ ), bem como o ângulo de inclinação ( $\lambda_s$ ) e ângulo de saída da ferramenta ( $\gamma_o$ ), apresentado na Equação 2.3:

$$\mu = \frac{F_f \cos \gamma_o - F_c \sin \gamma_o}{F_f \cos \lambda_s \sin \gamma_o + F_p \sin \lambda_s + F_c \cos \lambda_s \cos \gamma_o} \quad (2.3)$$

A Tabela 2.1 apresenta modelos matemáticos propostos por diversos autores. Chen, Whang e Wu (2021), Maekawa, Kitagawa e Childs (1997), Zorev (1963), Calamaz, Coupard e Girot (2008), Shirakashi e Usui (1973) e Filice *et al.* (2007) propuseram modelos matemáticos para determinar o coeficiente de atrito no corte ortogonal considerando a distribuição de tensões presentes na área de contato, porém todos apresentavam grande limitação de aplicabilidade. Moufki e Molinari (2005), Klocke *et al.* (2018), Hao *et al.* (2018) e Peng *et al.* (2020) propuseram modelos matemáticos considerando a temperatura de usinagem, os quais exigem complexos meios para a medição da temperatura durante o corte.

Tabela 2.1 – Modelos de coeficiente de atrito

Referência	Modelo de coeficiente de atrito	Observações
Chen, Whang e Wu (2021)	$\mu = \frac{A_a}{P_a} \left[ \tau_{s1} + \tau_{s1} \cdot f \left( \frac{\tau_{s1} H_1}{\tau_{s2} H_2} \right) \right]$	Modelo dinâmico que considera a distribuição de tensões na região de adesão
Maekawa, Kitagawa e Childs (1997)	$\mu = \frac{\tau_t}{\sigma_t}$	Substituiu a força de corte pela área de contato real e distribuição de tensão.
Zorev (1963)	$\tau = \begin{cases} \mu\sigma_n, & \tau < \tau_{máx}. \\ \tau_{máx}, & \tau \geq \tau_{máx}. \end{cases}$	Modelo que considera tensões normais e de cisalhamento definidas nas regiões de adesão e escorregamento.
Calamaz, Coupard e Girod (2008)	$\tau = \begin{cases} \mu\sigma_n, & \mu\sigma_n < m\sigma_0/\sqrt{3} \\ m\sigma_0/\sqrt{3}, & \mu\sigma_n \geq m\sigma_0/\sqrt{3} \end{cases}$	Considerando a lei Tresca limitada à Coulomb na interface ferramenta-cavaco.
Shirakashi e Usui (1973)	$\tau = k(1 - e^{-\mu\sigma/k})$	Considerando a tensão de cisalhamento constante na região de adesão, relação exponencial entre a tensão de cisalhamento, tensão normal e coeficiente de atrito.
Filice <i>et al.</i> (2007)	$\tau = mk$	Considerando atrito com tensão de cisalhamento constante na região de adesão e Coulomb na região de deslizamento.
Moufki e Molinari (2005)	$\mu = \mu_0 \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_m} \right)^q \right]$	Modelo do coeficiente de atrito dependente da temperatura em função da temperatura média da superfície de saída da ferramenta.
Klocke <i>et al.</i> (2018)	$\mu = \begin{cases} \mu_0, & T < T_0 \\ \mu_0 \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right], & T \geq T_0 \end{cases}$	Modelo de atrito dependente da temperatura levando em consideração o efeito de amolecimento.
Hao <i>et al.</i> (2018)	$\mu = C_1 \left\{ 1 - \left[ \frac{(T - T_r)}{(T_m - T_r)} \right]^{C_2} \right\} e^{f(\sigma)} [C_3 - C_4 \ln(V + C_5)]$	Considerando temperatura, cargas normais e velocidades de corte simultaneamente.
Peng <i>et al.</i> (2020)	$\mu = C_1 V^{C_2} T^{C_3} \sigma^{C_4}$	Coeficiente de atrito aparente baseado na velocidade de deslizamento relativa, pressão de contato e temperatura de contato.

Fonte: a autora (2023)

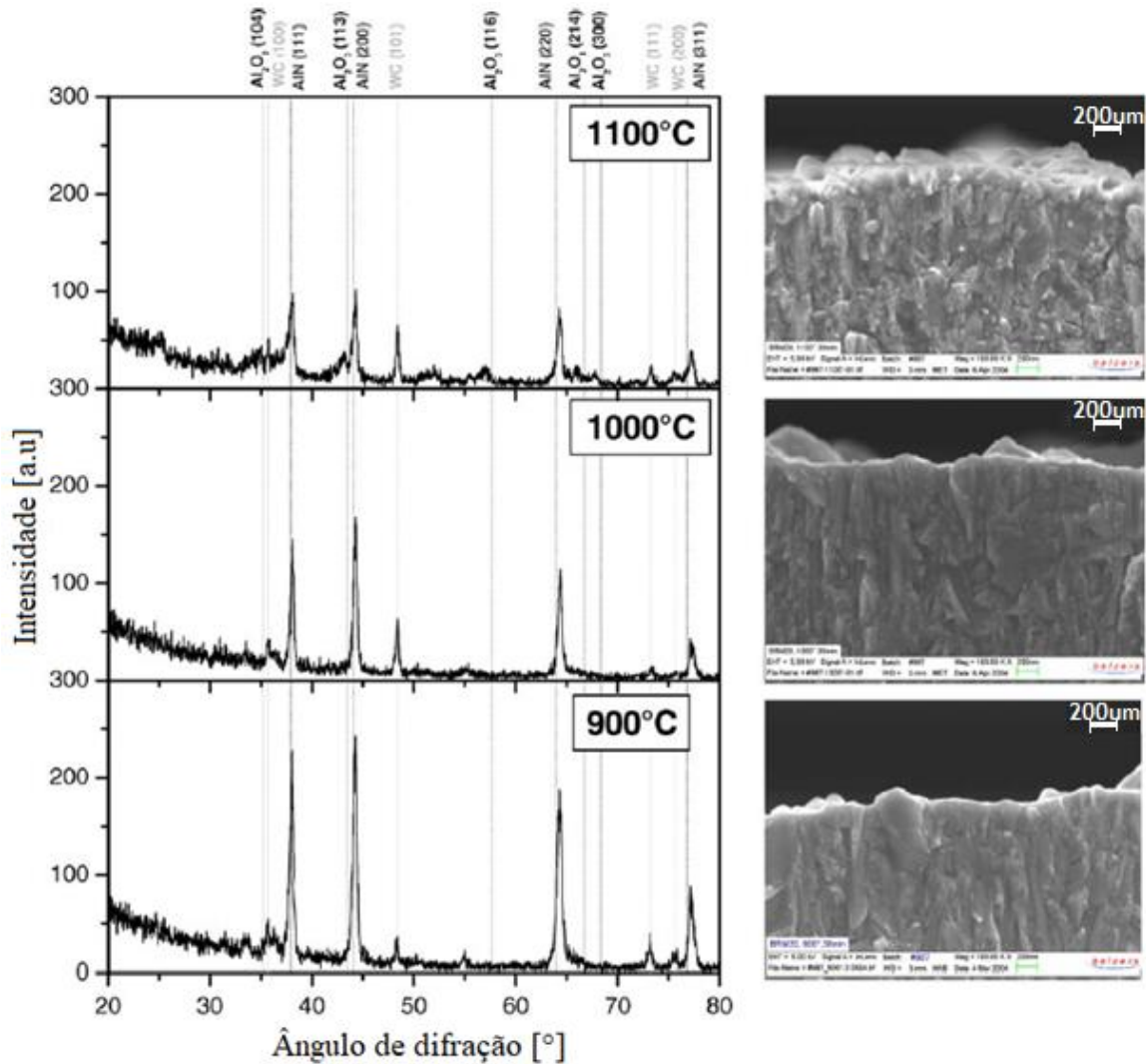
### 2.3 Revestimento AlCrN

Na usinagem, a escolha correta da ferramenta de corte deve considerar o material a ser usinado, a geometria de corte e o tipo de operação. A aplicação para a qual a ferramenta é designada pode exigir diversas propriedades como baixo atrito, alta resistência mecânica, tenacidade, resistência à oxidação, estabilidade química entre outros. Dificilmente um único material é capaz de suprir as diversas necessidades que tal operação exige. Assim, é possível combinar as propriedades do revestimento superficial do inserto. Muitas vezes esses revestimentos são compostos cerâmicos com alta dureza, resistência a corrosão e ao desgaste. Os revestimentos com multicomponentes são aplicados em uma única camada ou a combinação de múltiplas camadas (SOUZA, 2020; LUKASZKOWICZ *et al.*, 2020).

Revestimentos a base de nitreto de titânio (TiN) são muito comuns em ferramentas de corte por promover maior resistência à corrosão, desgaste abrasivo e oxidativo (KAWATE *et al.*, 2002). Segundo Lukaszowicz *et al.* (2020), os revestimentos cerâmicos à base de cromo, como o nitreto de cromo (CrN), além de apresentarem resistência ao desgaste abrasivo são uma alternativa aos revestimentos de TiN, por ter melhor desempenho em trabalhos à quente. A adição de alumínio nos revestimentos de CrN possibilitou a criação dos revestimentos de nitreto de cromo e alumínio (CrAlN) e nitreto de alumínio e cromo (AlCrN), com teor de alumínio inferior e superior a 70%, respectivamente. A adição de alumínio ao CrN apresenta melhora na dureza superficial, na resistência à fadiga mecânica e na resistência ao desgaste em condições de temperaturas elevadas (LING *et al.*, 2022).

O revestimento de AlCrN é geralmente destinado à usinagem de alta velocidade (LIAG *et al.*, 2022). Kalss *et al.* (2006) avaliaram o fresamento e furação usando ferramentas revestidas com AlCrN para o corte do aço AISI 1045. Na análise por MEV e EDS, observaram a resistência a oxidação do revestimento AlCrN por meio da seção transversal de três ferramentas de aço rápido revestidas com AlCrN aquecidas à 900, 1000 e 1100°C, como observado na Figura 2.11. Nenhum composto de óxido é evidente nas temperaturas de 900 e 1000°C. Na temperatura de 1100°C observa-se picos de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) com estrutura romboédrica. Para todas as temperaturas, foram encontrados picos fortes nitreto de alumínio (AlN) cúbica. No mesmo estudo, foi avaliado o desgaste de flanco das ferramentas revestidas com carbonitreto de titânio (TiCN), nitreto de titânio e alumínio (TiAlN) e AlCrN. As ferramentas com revestimento de AlCrN apresentaram o menor desgaste de flanco e maior resistência ao desgaste abrasivo comparado aos revestimentos de TiCN e TiAlN.

Figura 2.11 – Resistência à oxidação do AlCrN à 900, 1000 e 1100°C

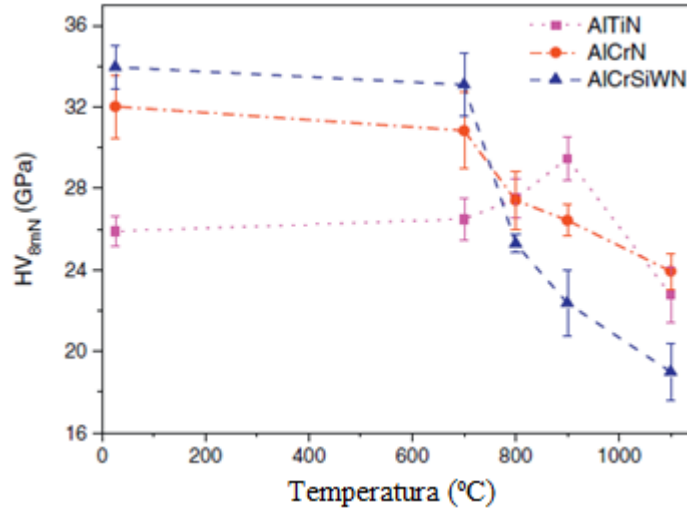


Fonte: adaptado de Kalss *et al.* (2006).

A estabilidade térmica do revestimento AlCrN é uma das características mais relevantes desse multicomponente. Segundo Feng *et al.* (2014), AlCrN pode ser a base para usinagem de materiais com baixa usinabilidade, como aços ferramentas e ligas aeroespaciais. Adições de outros elementos como o silício (Si) e o tungstênio (W) potencializam suas características. O estudo de Bobzin *et al.* (2011) mostra que a adição do W no multicomponente reduz a força de atrito em operações com temperatura de 800°C. Feng *et al.* (2014) analisaram a dureza em diferentes temperaturas dos revestimentos nitreto de alumínio e titânio (AlTiN), nitreto de alumínio cromo silício e tungstênio (AlCrSiWN) e AlCrN, o resultado pode ser visto na Figura 2.12. AlCrSiWN e AlCrN apresentam durezas muito próximas, porém AlCrSiWN em temperaturas acima de 700°C houve uma queda de cerca de 50% na dureza, apresentando a menor dureza em 1100°C. O AlCrN apresentou dureza muito superior ao AlTiN e uma queda

na dureza menos acentuada em temperaturas superiores à 700°C, e ainda possui a maior dureza dentre os outros revestimentos analisados na temperatura de 1100°C.

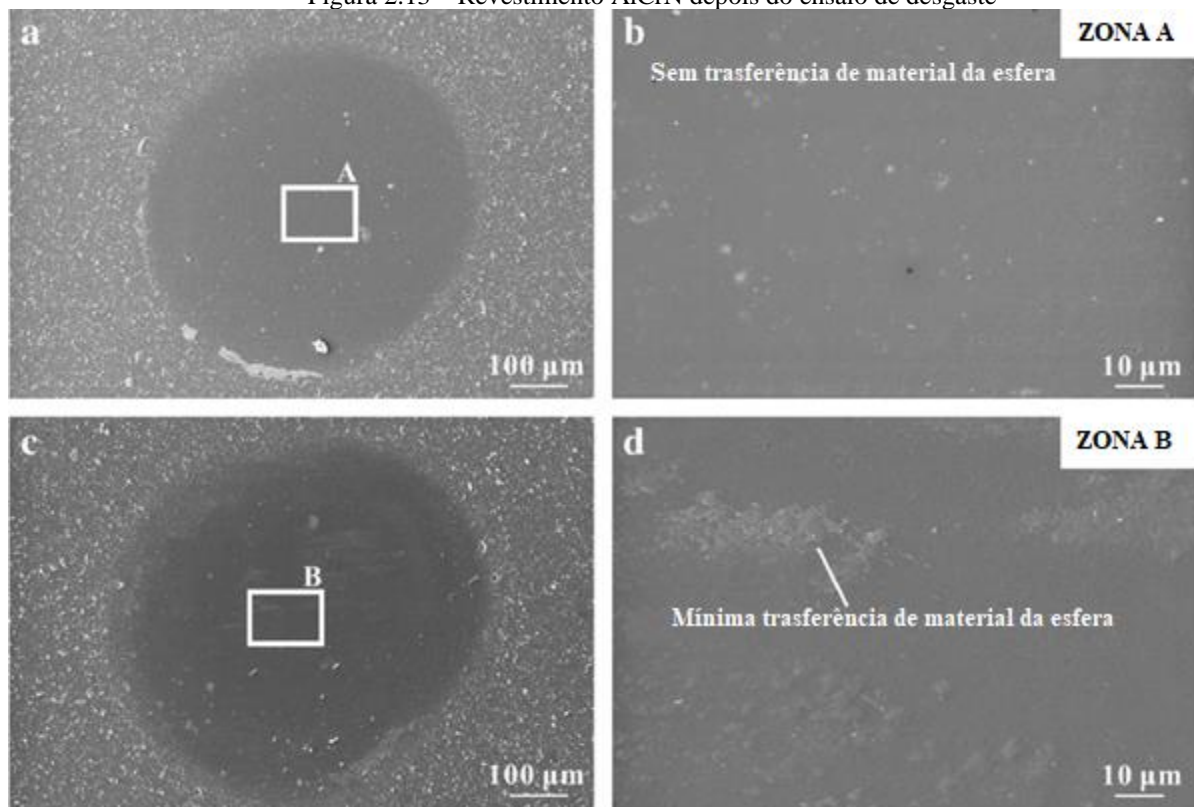
Figura 2.12 – Dureza dos revestimentos AlTiN, AlCrN e AlCrSiWN em função da temperatura



Fonte: adaptado de Feng *et al.* (2014)

O revestimento AlCrN também apresenta boa resistência ao impacto, resistência ao desgaste por abrasão e boa adesão ao substrato. Mo *et al.* (2013) avaliaram o desgaste de impacto e resistência à abrasão dos revestimentos AlCrN. No ensaio de desgaste de impacto, em cargas de 150 N e 300 N, não houve deslocamento de revestimento nem adesão do material da esfera de impacto, como visto nas imagens de MEV apresentadas na Figura 13a e 13b. Em ensaios de desgaste de ciclos de impacto, o revestimento AlCrN também apresentou boa resistência ao desgaste adesivo, com poucos pontos de transferência de material, como mostra a Figura 2.13c e 2.13d. Mo *et al.* (2013) apresentaram os resultados do AlCrN no ensaio de desgaste por abrasão em micro escala. As partículas de carboneto de silício (SiC) usadas no ensaio não se aderiram facilmente à superfície do revestimento de AlCrN, o qual apresentou pequenos pontos de desgaste, com sulcos do tamanho médios das partículas abrasivas usadas no teste. Desta maneira, o revestimento de AlCrN apresentou boa resistência ao desgaste abrasivo.

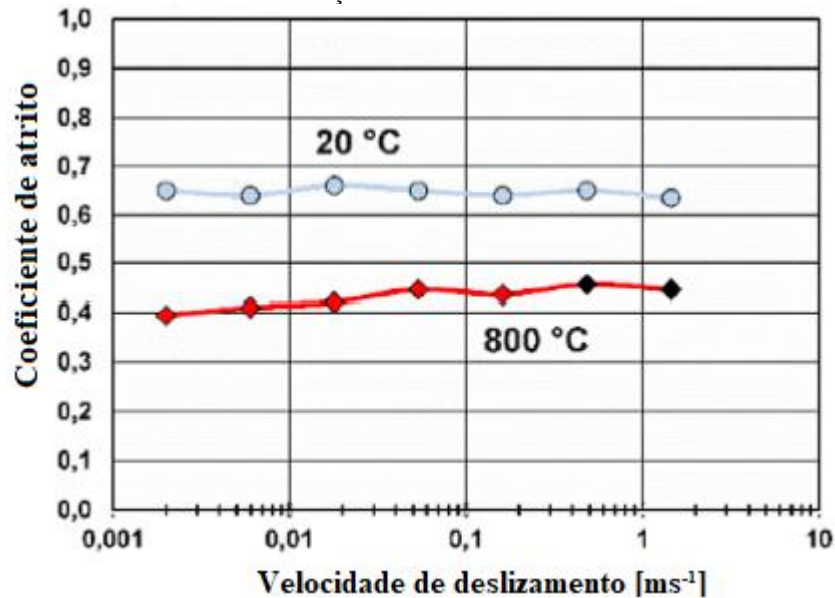
Figura 2.13 – Revestimento AlCrN depois do ensaio de desgaste



Fonte: adaptado de Mo *et al.* (2013)

Lukaszkoicz *et al.* (2020) compararam a adesão do revestimento AlCrN e AlCrN+CrCN. Para análise de adesão foi realizado o ensaio de riscamento, em que o revestimento AlCrN mostrou boa adesão, apresentando o primeiro dano no revestimento com cargas superiores a 19 N, enquanto a combinação de AlCrN+CrCN apresentou a partir de 13 N. O início da delaminação do revestimento AlCrN foi com cargas superiores a 40 N, enquanto a combinação de AlCrN+CrCN foi a partir de 46 N. Antonov *et al.* (2018) por meio do ensaio de pino sobre disco, avaliaram o efeito da temperatura e a velocidade de deslizamento no coeficiente de atrito do revestimento AlCrN. O ensaio foi realizado usando uma esfera de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , em temperatura ambiente de  $20^\circ\text{C}$ , o coeficiente de atrito apresentou valores entre 0,6 e 0,7 para diferentes velocidades de deslizamento, com o aumento da temperatura para  $800^\circ\text{C}$  houve uma redução drástica no coeficiente de atrito, o qual apresentou valores entre 0,4 e 0,5, conforme Figura 2.14. A redução do coeficiente de atrito se deve à formação do óxido  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , o qual age como um lubrificante sólido.

Figura 2.14 – Coeficiente de atrito em função da velocidade de deslizamento do revestimento AlCrN



Fonte: adaptado de Antonov *et al.* (2018)

## 2.4 Ensaio de compressão de anel

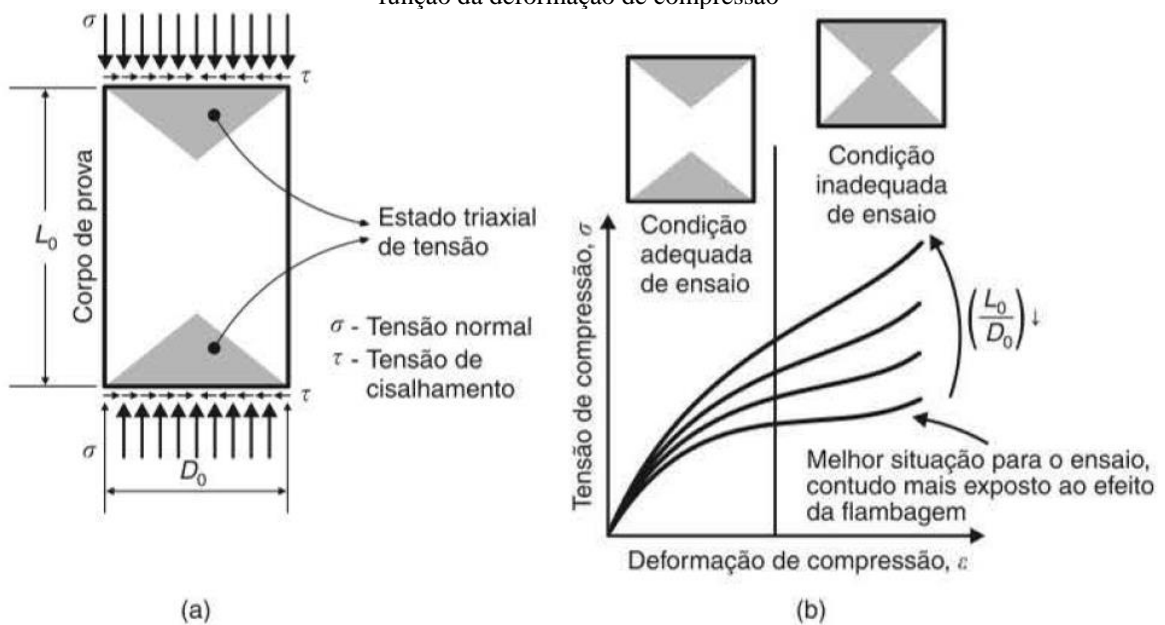
O ensaio de compressão de anel determina o coeficiente de atrito por meio da deformação plástica. O teste consiste em comprimir um anel entre duas matrizes paralelas, planas e rígidas, a fim de determinar o coeficiente de atrito entre o material do anel e o material das matrizes (RAO e SIVARAM, 1993). O anel com face plana e rugosidade conhecida tem dimensões previamente escolhidas. Geralmente usa-se a proporção 6:3:2 para determinar o tamanho do diâmetro externo, diâmetro interno e altura do anel, respectivamente. É aplicada uma força de compressão uniaxial sobre o conjunto matriz/anel, onde o anel é comprimido até que alcance uma deformação previamente determinada (SILVA *et al.*, 2017; MARTINS, 2018).

Neste método não é necessário medir diretamente a força de atrito e tampouco conhecer os valores de tensão de escoamento do material. Estas grandezas são as mais difíceis de se determinar em condições de alta temperatura e grandes deformações. Esta é uma das grandes vantagens do ensaio de compressão de anel, pois este depende somente das mudanças geométricas/dimensionais do anel (SOARES, 2013; MALE e DePIERRE, 1970; SRIVASTAVA, SHRIVASTAVA e MISHRA, 2019; RAO e SIVARAM, 1993).

A geometria anelar é fundamental para que os resultados sejam realizáveis. O ensaio de compressão convencional, realizado com um corpo de prova cilíndrico, possui uma distribuição de tensões compressivas diferentes de um corpo de prova anelar. A Figura 2.15a apresenta as tensões normais e cisalhantes de um corpo de prova cilíndrico submetido a compressão uniaxial.

As áreas sombreadas triangulares representam a região de um estado triaxial de tensão, onde não há deformação. A relação de comprimento inicial ( $L_0$ ) e diâmetro inicial ( $D_0$ ) influencia na tensão de compressão do ensaio e consequentemente, na deformação de compressão como mostra a Figura 2.15b. Quando a relação  $L_0/D_0$  atinge valores menores, as regiões de estado triaxial de tensão superior e inferior se sobrepõem, exigindo maiores solicitações de carga para a deformação do corpo de prova e o que pode limitar a realização do ensaio. (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2012).

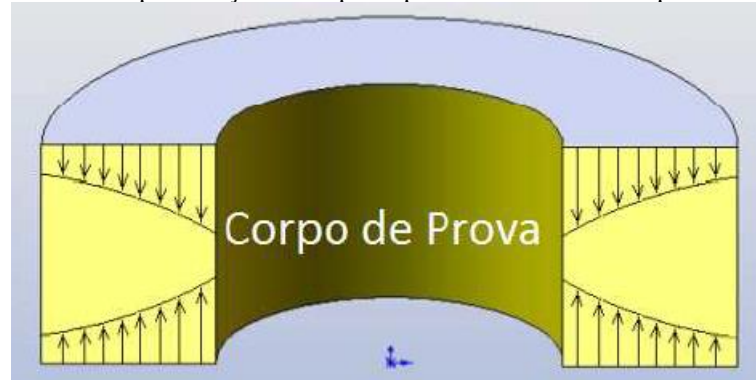
Figura 2.15 – Ensaio de compressão. a) representação dos esforços no corpo de prova; b) gráfico da tensão em função da deformação de compressão



Fonte: Garcia, Spim e Santos (2012)

O furo interno do anel não permite que as regiões do estado triaxial se encontrem (Figura 2.16), permitindo deformação mais uniforme e cargas compressivas menores. Para a proporção de  $L_0/D_0$  de 1/3, comumente usada no ensaio de compressão de anel, o esforço de compressão seria muito maior para um corpo de prova cilíndrico do que no formato de anel (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2012; BOESCH, MARTINS e SHAEFFER, 2011).

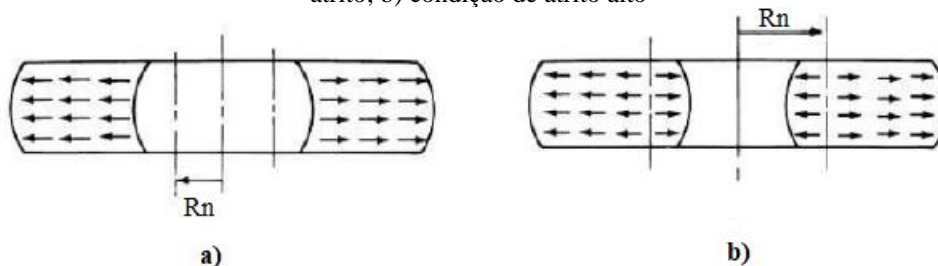
Figura 2.16 – Representação do corpo de prova no ensaio de compressão de anel



Fonte: Shneider *et al.* (2010)

O coeficiente de atrito é obtido pelas novas dimensões do anel deformado. Para compreender o comportamento da deformação é possível discorrer sobre três condições de atrito. A primeira, em uma condição hipotética, no qual não haveria atrito no conjunto matriz/anel e todo o material do anel fluiria radialmente para fora em uma taxa proporcional à quantidade de compressão. Assim, considerando a mesma condição de compressão, mas em uma situação em que o atrito é existente, seja de forma pequena ou moderada, parte do material do anel fluiria radialmente para fora e parte fluiria radialmente em direção do centro do anel, resultando em um diâmetro externo menor do que na condição sem atrito. Por fim, em uma situação extrema na qual a força de atrito é maior que um valor crítico, apenas uma pequena porção do material fluiria radialmente para fora e o restante fluiria em direção ao centro, resultando em um diâmetro externo menor do que os dois casos discutidos anteriormente. O diâmetro interno do anel deformado é um bom parâmetro para entender o comportamento do atrito. Para baixos valores de coeficientes de atrito, o diâmetro interno aumenta, para altos valores de coeficientes de atrito o diâmetro interno diminui, conforme ilustrado na Figura 2.17 (MALE e DePIERRE, 1970; RAO e SIVARAM, 1993).

Figura 2.17 – Raio neutro ( $R_n$ ) e a influência do atrito no diâmetro interno do anel. a) condição de baixo atrito; b) condição de atrito alto



Fonte: adaptado de Soares (2013)

Para de fato determinar o coeficiente de atrito é necessário recorrer a um modelo matemático. Avitzur (1964) e posteriormente Hawkyard e Johnson (1967) desenvolveram uma solução matemática com base na análise de tensão, como mostra a Equação 2.4:

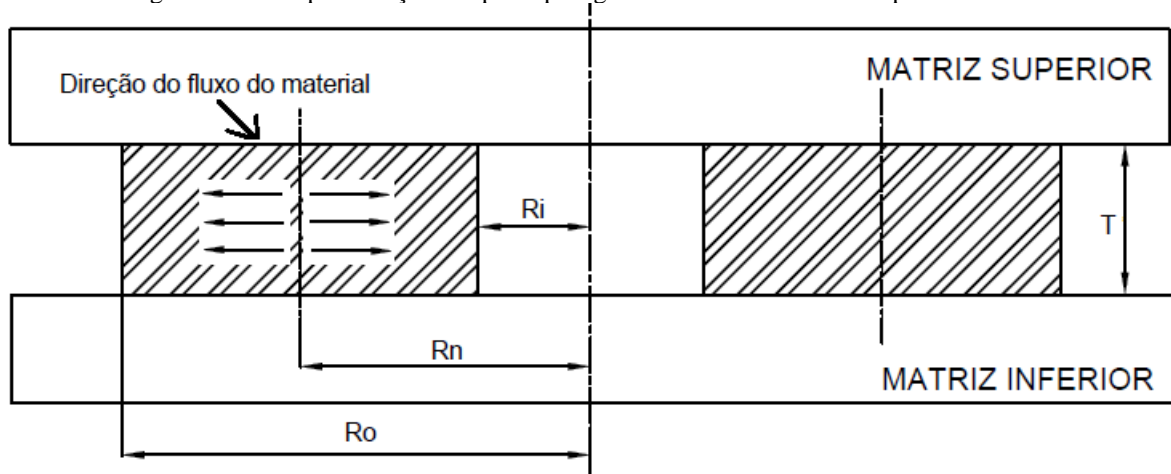
$$\tau = m \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \quad (2.4)$$

Onde,  $\tau$  é a tensão de cisalhamento na interface,  $m$  é a constante do fator de atrito,  $\sigma_0$  é a tensão de escoamento do anel. Todos os três parâmetros são assumidos como constantes. O modelo matemático apresentado na Equação 2.4, assume três condições, das quais são:

- A deformação do anel é uniforme em toda a espessura, a tensão de atrito é distribuída uniformemente em toda a espessura do material;
- O material do anel obedece à lei de fluxo de von mises, portanto não há efeito de encruamento, deformação elástica e alteração volumétrica;
- Para um determinado conjunto matriz/anel existe uma constante do fator de atrito  $m$  sob condições de superfície e temperatura constantes.

Para determinar o fator de atrito é necessário primeiro conhecer a posição do raio neutro ( $R_n$ ). O raio neutro é a posição neutra que divide o sentido do fluxo de material do anel, onde parte do material flui no sentido do raio externo e parte flui no sentido do raio interno, conforme a Figura 2.18.

Figura 2.18 – Representação das principais grandezas do ensaio de compressão de anel



Fonte: adaptado e traduzido de Male e DePierre (1970)

Diversos autores propõem o cálculo para a constante do fator de atrito ( $m$ ). O estudo realizado por Rao e Sivaram (1993) apresenta um comparativo entre diversos autores, como Male e DePierre (1970), Lee e Altan (1972) e Avitzur (1964). Os autores apresentam diferentes

abordagens considerando outros fatores, como temperatura e velocidade de deformação, mas a maioria deles baseiam-se na análise de Avitzur (1964). Segundo Rao e Sivaram (1993), as análises não têm efeito sistemático sobre o fator de atrito, tornando a análise de Avitzur (1964) uma estimativa confiável. Para determinar a constante do fator de atrito, segundo o modelo matemático apresentado por Avitzur (1964) e Avitzur e Kohser (1978), o raio neutro deve ser determinado experimentalmente pela da Equação 2.5.

$$\left(\frac{R_n}{R_o}\right)^2 = \frac{\frac{R_i}{R_o} \frac{\Delta R_i}{\Delta R_o}}{\frac{R_o}{R_i} \frac{\Delta R_i}{\Delta R_o}} \quad (2.5)$$

Onde,  $R_n$  é o raio neutro,  $R_i$  é o raio interno final do anel,  $R_o$  é o raio externo final do anel,  $\Delta R_i$  é a variação do raio interno com a deformação e  $\Delta R_o$  é a variação do raio externo com a deformação.

Desta maneira, quando o raio interno se expande, ou seja:

$$R_n \leq R_i$$

Então, a constante do fator de atrito é:

$$m = \frac{-1}{2 \frac{R_o}{T} (1 - \frac{R_i}{R_o})} \ln \left[ \left(\frac{R_i}{R_o}\right)^2 \frac{1 + \sqrt{1 + 3\left(\frac{R_o}{R_n}\right)^4}}{1 + \sqrt{1 + 3\left(\frac{R_i}{R_o}\right)^4 + \left(\frac{R_o}{R_n}\right)^4}} \right] \quad (2.6)$$

Onde T é a espessura final do anel.

Quando o raio interno é reduzido, ou seja:

$$R_i \leq R_n \leq R_o$$

Então,

$$m = \frac{-1}{2 \frac{R_o}{T} (1 + \frac{R_i}{R_o} - 2 \frac{R_n}{R_o})} \ln \left[ \left(\frac{R_i}{R_o}\right)^2 \frac{1 + \sqrt{1 + 3\left(\frac{R_o}{R_n}\right)^4}}{1 + \sqrt{1 + 3\left(\frac{R_i}{R_o}\right)^4 + \left(\frac{R_o}{R_n}\right)^4}} \right] \quad (2.7)$$

Como visto na Equação 2.2 o coeficiente de atrito pode ser dado pela razão entre a tensão de cisalhamento e a tensão de normal. Então a Equação 2.4 pode ser rescrita como:

$$\mu = \frac{m}{\sqrt{3}} \quad (2.8)$$

Desta maneira, o resultado experimental do ensaio de compressão de anel é combinado com uma análise matemática, resultando no coeficiente de atrito. A fim de facilitar o ensaio, vários autores como Avitzur (1964), Goetz *et al.* (1991) e Mirahmadi, Hamed e Cheraghzadeh (2015), apresentam o fator de atrito por meio das curvas de calibração (Figura 2.19). A curva de calibração é resultado de uma análise experimental e matemática, onde os ensaios são realizados em diferentes níveis de compressão. A curva de calibração é a relação do percentual de redução do diâmetro interno em função da redução da espessura do anel, Equação 2.9 e 2.10 respectivamente (BOESCH, MARTINS e SHAEFFER, 2011).

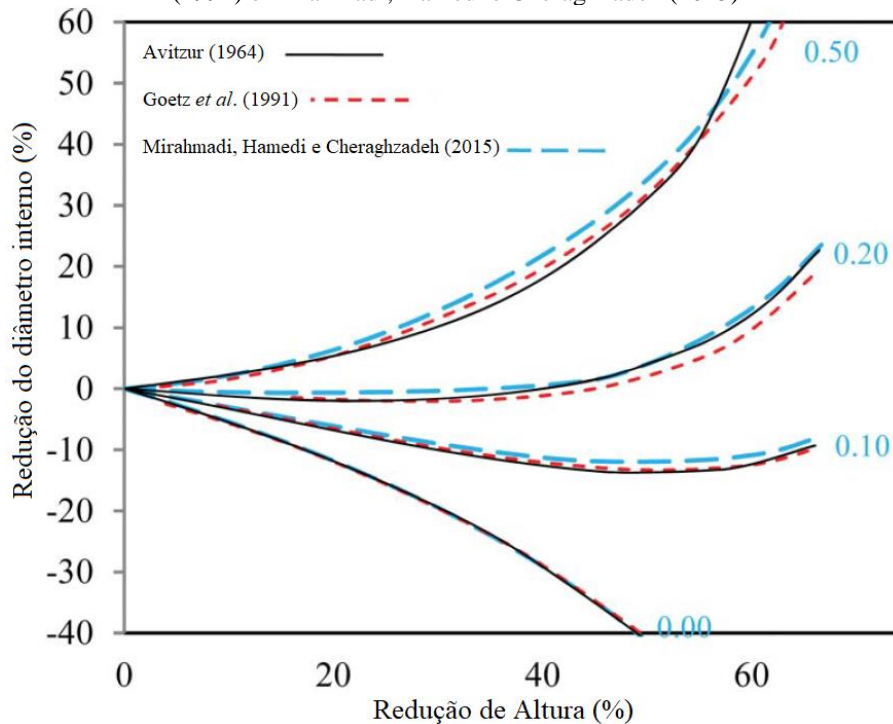
$$\%D = \frac{D_i - D}{D_i} \cdot 100\% \quad (2.9)$$

Onde  $\%D$  é a variação diâmetro interno,  $D_i$  é o diâmetro interno inicial e  $D$  é o diâmetro interno final.

$$\%T = \frac{T_i - T}{T_i} \cdot 100\% \quad (2.10)$$

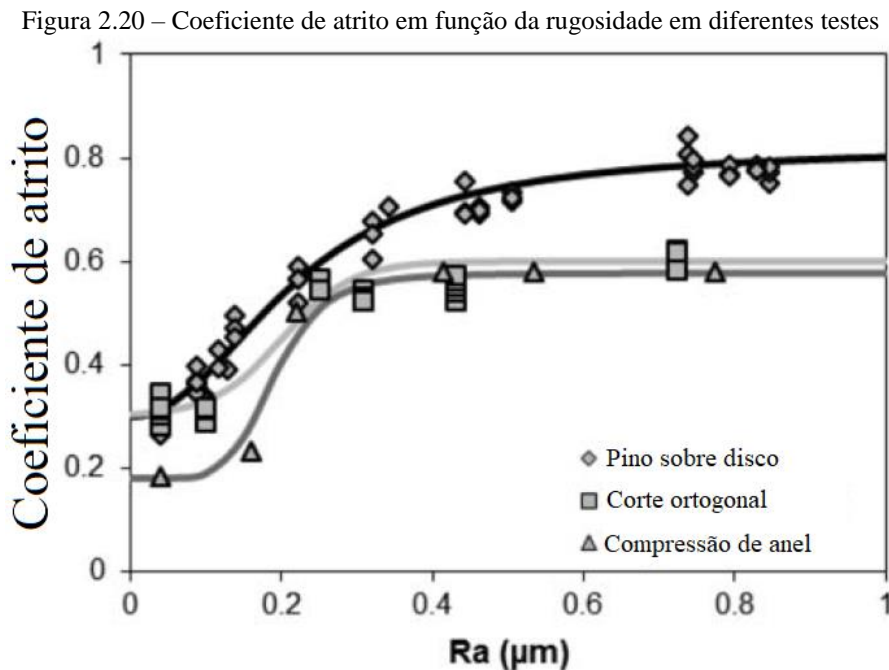
Onde  $\%T$  é a redução da espessura,  $T_i$  é espessura inicial e  $T$  é espessura final do anel.

Figura 2.19 – Comparação entre as curvas de calibração propostas pelos autores Avitzur (1964), Goetz et al. (1991) e Mirahmadi, Hamed e Cheraghzadeh (2015)



Fonte: adaptado e traduzido de Mirahmadi, Hamed e Cheraghzadeh (2015)

O teste de compressão de anel é muito empregado para avaliar atrito em processos de conformação de metais (NOH, MIN e HWANG, 2011). Cristino *et al.* (2014) avaliaram o coeficiente de atrito na usinagem usando o ensaio de compressão de anel e pino sobre disco. Os ensaios foram realizados com o aço inoxidável AISI 306L, sem lubrificantes, em temperatura ambiente, com atmosfera controlada e variando apenas rugosidade das amostras. Como visto na Figura 2.20, o teste que mais se aproximou do coeficiente de atrito do corte ortogonal foram o ensaio de compressão de anel.



Fonte: traduzido de Cristino *et al.* (2014)

Contudo, Cristino *et al.* (2014) realizaram o ensaio de torneamento com o corte ortogonal e determinaram o coeficiente de atrito na usinagem utilizando a simplificação de que o coeficiente de atrito é a razão da força de avanço e a força de corte. No ensaio de compressão de anel, os valores de coeficiente de atrito foram obtidos por meio das curvas de calibração. Devido a estes fatores, a simplificação e a falta de precisão podem mascarar os resultados e interferir na análise.

### 3. CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

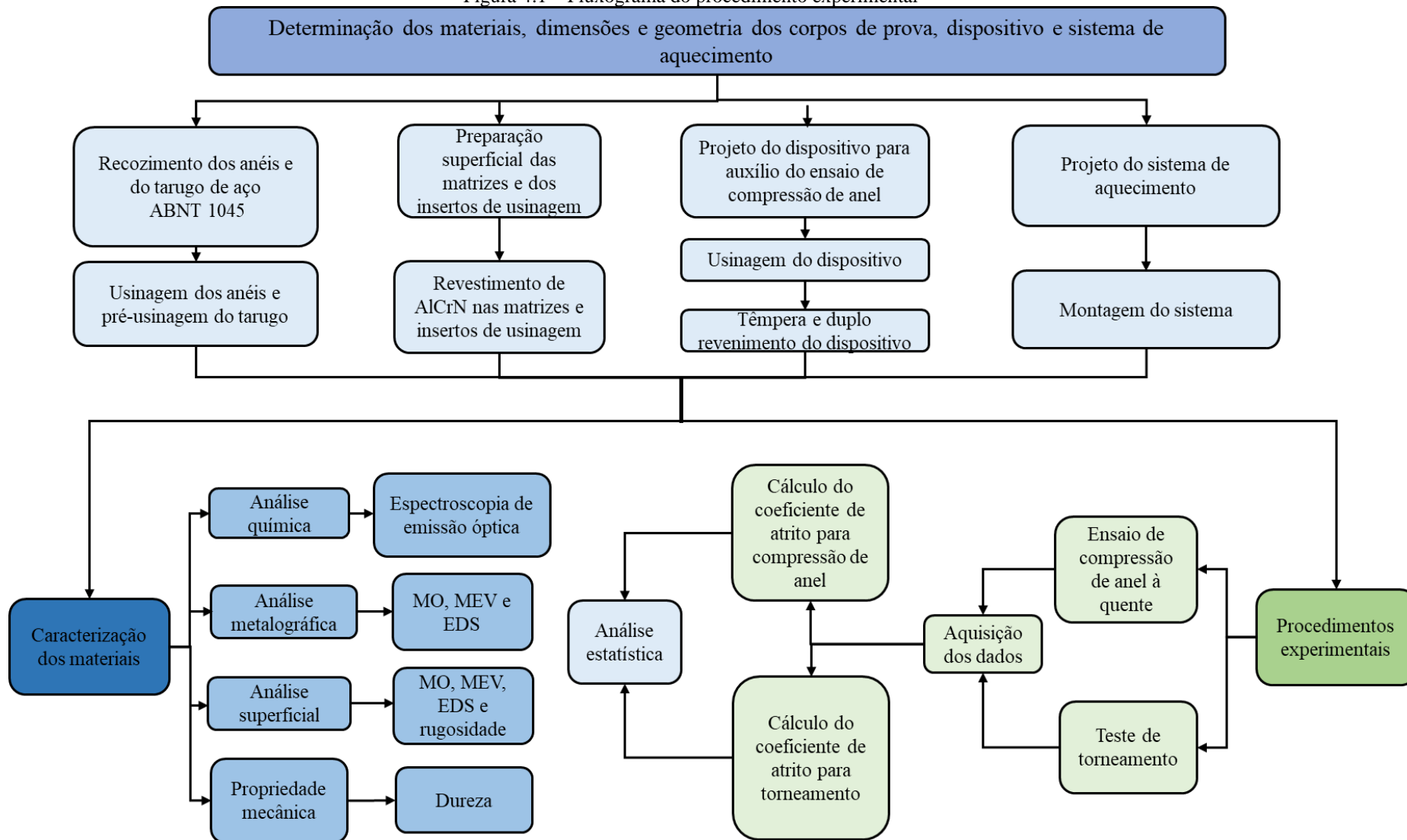
À luz do exposto no capítulo 2 “Revisão Bibliográfica”, dada a importância de conhecer o atrito presente na interface ferramenta/cavaco na usinagem, há muitos esforços para o desenvolvimento de métodos experimentais e/ou modelos matemáticos que sejam capazes de simular as condições de corte. Como visto, o ensaio de compressão de anel foi utilizado por Cristino *et al.* (2014) a fim de comparar com os resultados do coeficiente obtido no ensaio de torneamento. Porém ainda não foi realizado um ensaio de compressão com aquecimento das amostras que considere as temperaturas presentes no torneamento. Tampouco, um ensaio que considere materiais comumente usados nas ferramentas de corte, como o metal duro com revestimento fino. Visto isso, este trabalho se propõe em verificar a compatibilidade do coeficiente de atrito encontrado no ensaio de compressão e no ensaio de torneamento. Para isso, utilizou-se de temperaturas associadas ao torneamento segundo trabalhos acadêmicos para realização do ensaio de compressão de anel, bem como materiais típicos na usinagem, como o aço ABNT 1045 e ferramentas de corte de metal duro revestidas com AlCrN. E ainda, no ensaio de torneamento, foi usado o modelo matemático para o corte oblíquo que considera a força de corte, força de avanço, força passiva e os ângulos de inclinação e saída da ferramenta de corte.

#### 4. METODOLOGIA

Este capítulo destina-se a descrever os materiais, equipamentos e metodologia desenvolvida para este trabalho de dissertação. O procedimento experimental visa observar o comportamento do coeficiente de atrito durante os ensaios de torneamento e compressão de anel. A metodologia consiste em três grandes grupos, conforme o fluxograma apresentado na Figura 4.1. A primeira etapa consiste na preparação das amostras de aço ABNT 1045 e WC-10Co, do dispositivo e do sistema de aquecimento necessários para o ensaio de compressão de anel. A segunda parte consiste na caracterização das amostras por meio da análise química qualitativa e quantitativa, análise microestrutural qualitativa e análise da rugosidade e dureza superficial. A terceira e última parte consiste nos ensaios de torneamento a seco do aço ABNT 1045 em diferentes velocidades de corte e no ensaio de compressão de anel em diferentes temperaturas, a fim de determinar o coeficiente de atrito em cada ensaio.

A usinagem das amostras e do dispositivo foram feitas no Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG) na unidade de Contagem. Os revestimentos foram produzidos pela *Oerlikon Balzers*®. O tratamento térmico foi feito no Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica na PUC-MG Contagem. Os procedimentos experimentais foram realizados no Laboratório de Usinagem e Automação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e no Laboratório de Conformação da PUC-MG Contagem. A caracterização mecânica e microestrutural foi feita no Instituto Politécnico da PUC-MG e no Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-MG Contagem. A análise química foi realizada nos laboratórios de ensaios e análises em materiais (LAMAT) do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial da Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais de Itaúna (SENAI-Itaúna).

Figura 4.1 – Fluxograma do procedimento experimental



Fonte: a autora (2023)

## 4.1 Materiais

Os materiais usados para a fabricação dos corpos de prova, bem como o material da ferramenta de corte utilizado para a realização do trabalho experimental são descritos e justificados neste tópico.

### 4.1.1 Corpos de prova

Este tópico apresenta os materiais usados para a fabricação dos anéis e matrizes usados no ensaio de compressão de anel e o material usado para a realização do ensaio de torneamento.

#### 4.1.1.1 Anel

Foi adquirido um tarugo de 76,2 mm de diâmetro e 460 mm de comprimento de aço ABNT 1045 para a fabricação dos anéis e do tarugo usado no ensaio de torneamento. Para a realização do ensaio de compressão de anel, o tarugo foi cortado e usinado ficando com diâmetro de 25 mm e comprimento de 150 mm. A composição química do aço é descrita na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Composição química do aço ABNT 1045

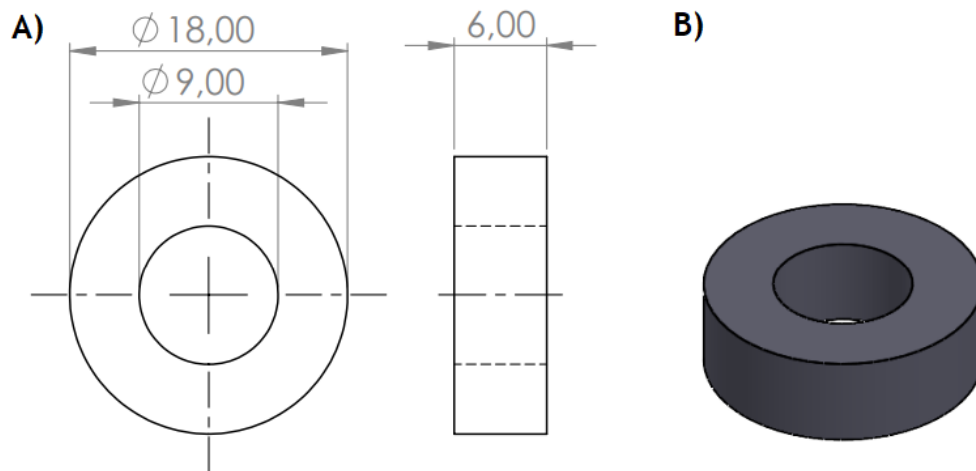
<b>Elemento Químico</b>	<b>%C</b>	<b>%Mn</b>	<b>%P</b>	<b>%S</b>
	0,430-0,50	0,600-0,900	0,040 máx.	0,050 máx.

Fonte: ASTM (2015)

Para garantir uniformidade na microestrutura, a barra de aço ABNT 1045 foi submetida ao tratamento térmico de recozimento. Para a realização do tratamento térmico foi feito o aquecimento até 840 °C, mantido por 2 horas, então foi resfriado no forno até atingir 700 °C, mantido por 6 horas e em seguida foi resfriado no forno até a temperatura ambiente.

Após o tratamento térmico os anéis foram usinados. A geometria do anel obedeceu a proporção 6:3:2 comumente usada para ensaio de compressão de anel. Foram usinados 12 anéis, com diâmetro externo de 18 mm, diâmetro interno de 9 mm e espessura de 6 mm. Conforme a Figura 4.2.

Figura 4.2 – Imagem representativa do anel: a) desenho mecânico com as dimensões; b) vista isométrica do anel



Fonte: a autora (2023)

#### 4.1.1.2 Matriz de compressão de anel

O material de base das matrizes usadas para o ensaio de compressão de anel foi o carboneto de tungstênio com adição de cobalto (WC-10Co) da classe YL10.2 do fabricante ZCC<sup>®</sup>, indicado para operações gerais de usinagem. As principais características químicas e físicas do WC-10Co são descritas na Tabela 4.2.

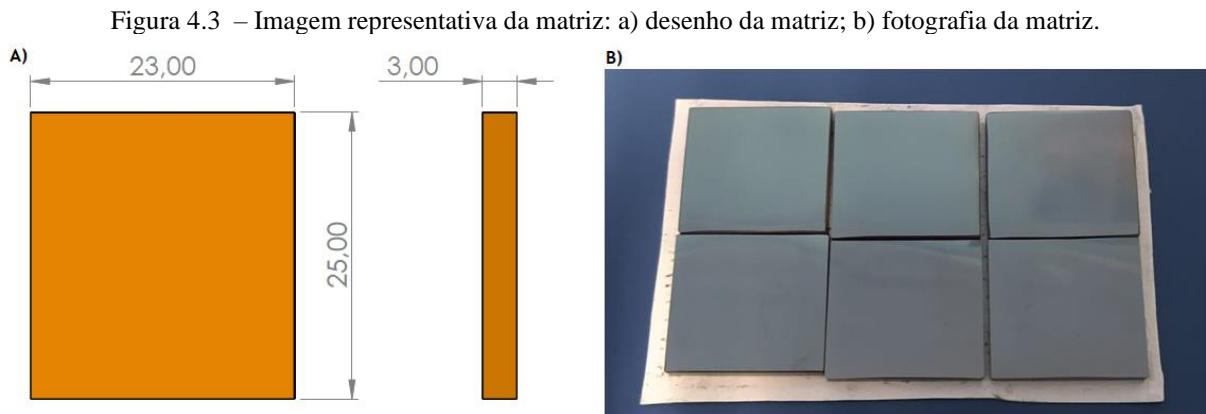
Tabela 4.2 – Propriedades químicas e físicas do WC-10Co

Composição Química		Propriedades Físicas			
WC	Co	Tamanho de grão ( $\mu\text{m}$ )	Dureza (HV30)	Densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Resistência à fratura ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ )
90%	10%	0,8	1600	14,42	14,6

Fonte: traduzido e adaptado de ZCC (2018)

Foram adquiridas 24 placas de WC-10Co, com dimensões adequadas para a finalidade. As placas possuíam 25 mm de largura, 23 mm de comprimento e 3 mm de espessura. Para garantir o mesmo acabamento superficial em todas as matrizes, foi necessário que estas fossem retificadas. A retificação foi feita até alcançar rugosidade  $R_a$  (desvio médio aritmético) de 0,02  $\mu\text{m}$ , acabamento recomendado pela Oerlikon Balzers<sup>®</sup> para aplicação do revestimento AlCrN (Balinit Alcrona Pro<sup>®</sup>) pelo processo de *magnetron sputtering* de deposição física de vapor (PVD). Após a preparação superficial, as matrizes foram enviadas à Oerlikon Balzers<sup>®</sup> para a

realização do revestimento superficial. Foi aplicada uma camada de 2  $\mu\text{m}$  de espessura de AlCrN as faces das matrizes. A Figura 4.3 apresenta o desenho das matrizes com as respectivas dimensões, bem como uma fotografia das matrizes após o revestimento.



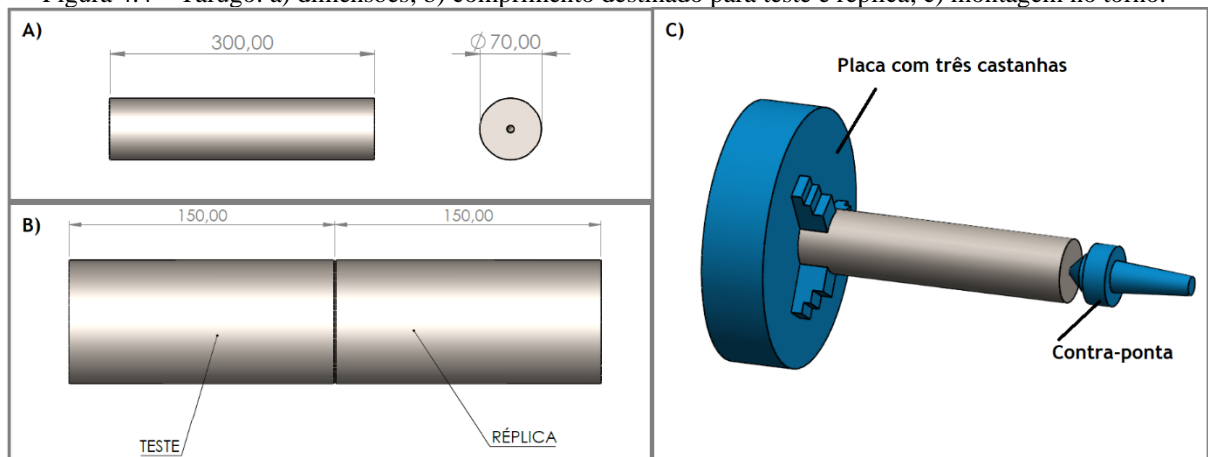
Fonte: a autora (2023)

#### 4.1.1.3 Barra cilíndrica de aço ABNT 1045

Para a realização do ensaio de torneamento, foi utilizado o tarugo de 76,2 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento de aço ABNT 1045. Semelhantemente à preparação do anel descrita anteriormente, foi necessário o tratamento térmico de recozimento para garantir uma uniformidade na microestrutura. Para a realização do tratamento térmico foi feito o aquecimento até 840°C, mantido por 2 horas, resfriado até 700°C, mantido por 6 horas e em seguida foi resfriado em forno até a temperatura ambiente.

Foi necessário usinar o tarugo para remover a carepa proveniente do tratamento térmico. Durante a usinagem, também foram feitos furos de centro nas extremidades para permitir a fixação do tarugo durante o ensaio de torneamento. A geometria final do tarugo, bem como a área útil de usinagem são descritas na Figura 4.4. Foram destinados 150 mm de comprimento para a realização do ensaio e uma igual parte para réplica do ensaio.

Figura 4.4 – Tarugo: a) dimensões; b) comprimento destinado para teste e réplica; c) montagem no torno.

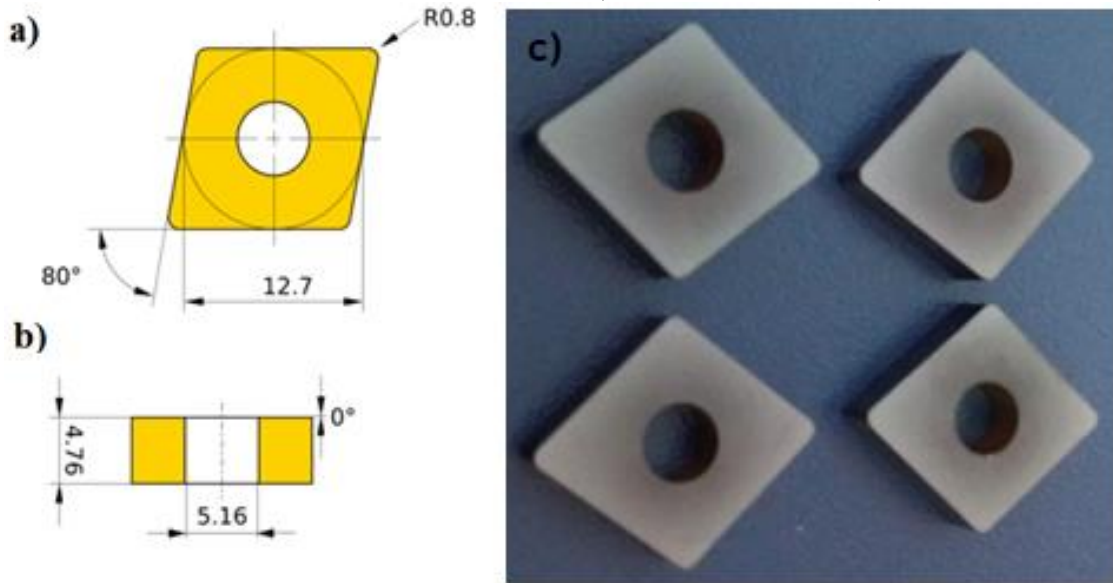


Fonte: a autora (2023)

#### 4.1.2 Ferramenta de corte

Insertos para torneamento com revestimento de AlCrN não são encontrados comercialmente. Então, para o ensaio de torneamento foram utilizados insertos WC-Co do modelo ISO CNMG 120408 classe P25. Como o revestimento AlCrN e a investigação do atrito no torneamento são de interesse do trabalho, a retirada do quebra-cavaco do inserto foi necessária. As faces onde se encontram a superfície de saída do cavaco foram retificadas até remover toda a geometria do quebra-cavaco e alcançar rugosidade superficial de  $0,02 \mu\text{m}$ . Após esta preparação, os insertos foram enviados à *Oerlikon Balzers*<sup>®</sup> e foram revestidos com AlCrN (Balinit Alcrona Pro<sup>®</sup>) pela técnica de *magnetron sputtering* de deposição física de vapor (PVD). O inserto após a aplicação do revestimento possui ângulo de saída ( $\gamma_o$ ) de  $0^\circ$ . A ferramenta possui ângulo de ponta da ferramenta ( $\epsilon_r$ ) de  $80^\circ$  e raio de ponta de 0,8 mm, as principais dimensões do inserto são apresentadas na Figura 4.5. Foi utilizado o porta-ferramenta PCLNR 2020K-12 o qual possui ângulo de inclinação ( $\lambda_s$ ) de  $-6^\circ$  e ângulo de posição da ferramenta ( $\chi_r$ ) de  $95^\circ$ , com isso possui um ângulo de saída ( $\gamma_o$ ) efetivo de  $-6^\circ$ .

Figura 4.5 – Representação da ferramenta de corte: a) vista superior; b) vista da seção transversal; c) imagem da ferramenta revestida com AlCrN (dimensões em milímetros)



Fonte: a autora (2023)

## 4.2 Equipamentos

Este tópico destina-se a descrever os equipamentos utilizados para a realização do trabalho experimental.

### 4.2.1 Análise da composição química

Para análise quantitativa da composição química foi utilizado um espectrômetro de emissão ótica *SPECTROMAXx*<sup>®</sup> modelo 159239.

### 4.2.2 Análise microestrutural

Para análise da microestrutura do anel foi utilizado no microscópio óptico *Zeiss*<sup>®</sup> modelo Axio Lab.A1 por meio do *software AxioVision LE64*<sup>®</sup>, com captura de imagem com 50x até 1000x de ampliação.

#### 4.2.3 Dureza

O ensaio de dureza Vickers foi realizado no durômetro Vickers *Wolpert*®. O ensaio de microdureza Vickers foi feito no microdurômetro *Shimadzu*® modelo HMV-2T com o auxílio do *software HMV-AD*®.

#### 4.2.4 Análise superficial

A análise das superfícies do anel, matriz e inserto foram realizadas por meio de imagens obtidas do microscópio óptico (MO) *Zeiss*® modelo Axio Lab.A1 por meio do *software AxionVision LE64*® e microscópio eletrônico de varredura (MEV) *Jeol*® modelo JSM IT 300. Durante o ensaio do MEV, equipado com sonda de espectroscopia de energia dispersiva de Raio-X (EDS), foi possível análise qualitativa da composição química da superfície das amostras em regiões micrométricas. A rugosidade foi medida pelo rugosímetro *Mitutoyo*® modelo SJ-210.

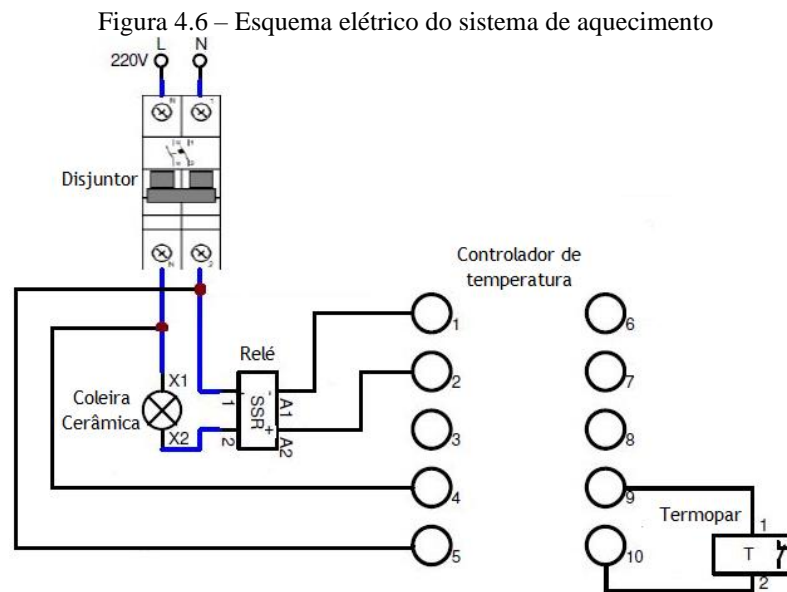
#### 4.2.5 Ensaio de torneamento

O ensaio de torneamento foi realizado utilizando um torno *CNC ROMI Centur 30S* com potência máxima de 5,5 kW e rotação máxima de 3500 rpm com comando numérico *Mach 9*. Durante o ensaio de torneamento, foi realizada a aquisição dos sinais das componentes de força da usinagem por meio de um dinamômetro *Kistler*® modelo 9272. Os sinais captados são convertidos em tensão elétrica por meio amplificador *Kistler*® do modelo 5073. A aquisição dos dados foi feita pela placa aquisição de dados *National Instruments*® modelo NI USB-6366. A leitura das componentes de força foi feita por meio do *software NI LabView SignalExpress*® 2013. Com o *Excel 2019*® os dados obtidos foram tratados e analisados.

#### 4.2.6 Ensaio de compressão de anel

O ensaio de compressão de anel foi realizado em uma prensa hidráulica com pressão máxima de 400 kgf/cm<sup>2</sup>. O aquecimento foi feito por uma resistência cerâmica tipo coleira com potência máxima de 2400W. A coleira foi revestida com manta térmica da *FIBERFRAX*® modelo Manta Durablanket 1400 para minimizar a troca de calor com o ambiente. O controle

da temperatura dentro da coleira foi realizado por meio de um termopar do tipo K ligado ao controlador de temperatura *REX*<sup>®</sup> modelo C100. O relé de estado sólido *FORTK*<sup>®</sup> modelo SSR-25 DA, responsável pelo acionamento da resistência cerâmica, foi controlado pelo controlador de temperatura. Todo sistema de aquecimento tinha como dispositivo de segurança o disjuntor bipolar *WEG*<sup>®</sup> modelo MDW C50. O esquema de ligação elétrica do sistema de aquecimento é apresentado na Figura 4.6.



Fonte: a autora (2023)

As medidas iniciais e finais dos anéis foram realizadas por meio do paquímetro digital MITUTOYO<sup>®</sup> de “0-150 mm” com resolução de 0,01 mm.

### 4.3 Métodos

Neste tópico são descritos os métodos empregados para cada análise e ensaio experimental realizado neste trabalho.

#### 4.3.1 Análise da composição química

Para análise da composição química do aço ABNT 1045, foram retiradas amostras após o tratamento térmico de recozimento. Para a determinação da porcentagem de carbono, manganês e silício foi realizada análise por meio da espectroscopia de emissão ótica. A

metodologia empregada foi segundo o procedimento IT LAB 249 do LAMAT e segundo as normas ASTM E415:2017, ASTM E1086:2014 e ASTM A751:2014a.

#### *4.3.2 Caracterização microestrutural*

Foi realizada a caracterização microestrutural do anel antes e depois do ensaio de compressão. A amostra do anel antes do ensaio de compressão foi recolhida depois do tratamento de recozimento. Posteriormente, foram recolhidos dois anéis, um após o ensaio de compressão na temperatura de 200°C e outro após o ensaio na temperatura de 400°C. A preparação das amostras consistiu em corte da amostra na seção transversal por meio da cortadora metalográfica. Com as amostras já cortadas, estas foram embutidas à quente com baquelite e lixadas com lixas com granulometria de 120, 200, 400, 600, 800 e 1200, respectivamente. Após o lixamento, as amostras foram polidas com alumina em suspensão e em seguida foi realizado o ataque químico com Nital com concentração de 2% durante 10 s, a fim de revelar a microestrutura. As imagens da microestrutura foram obtidas via MO.

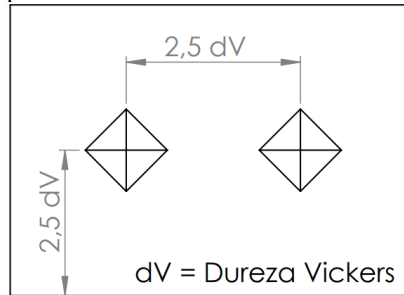
#### *4.3.3 Dureza*

O ensaio de dureza Vickers foi realizado ao longo da seção transversal do anel utilizando carga de 30 kgf, foram feitas dezoito medições nos grãos de perlita e ferrita.

O ensaio de microdureza Vickers foi usado para a análise do perfil de microdureza ao longo da seção transversal dos anéis deformados pelo ensaio de compressão nas temperaturas de 200 e 400°C. O ensaio foi realizado segundo a norma ASTM E384-05a. As amostras utilizadas para o ensaio de microdureza Vickers foram as mesmas preparadas para análise da caracterização microestrutural citada anteriormente na seção 4.3.3.

As endentações foram feitas com carga de 0,2 kgf durante 15 s. A distância entre as endentações obedeceu a distância mínima recomendada pela norma ASTM E384-05a. O espaçamento vertical entre as endentações e o espaçamento mínimo da superfície foram de 0,1 mm, equivalente a 2,5 vezes da maior diagonal verificada na endentação, conforme Figura 4.7.

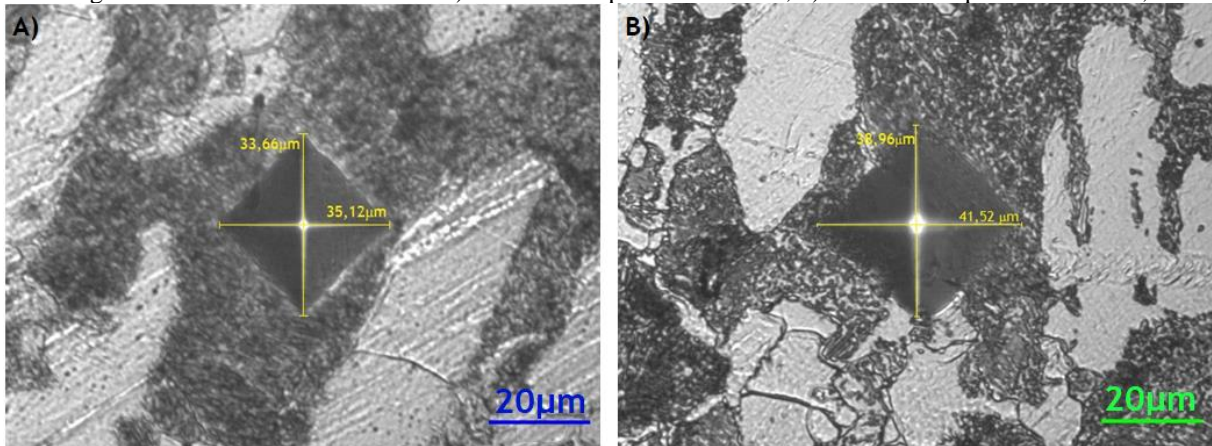
Figura 4.7 – Espaçamento mínimo para o ensaio de microdureza Vickers segundo a norma ASTM E384-05a.



Fonte: adaptado e traduzido de ASTM E384-05a (2023)

Após medir as diagonais da indentação (Figura 4.8) a macro e a microdureza foi determinada pela Equação 4.1, conforme a norma ASTM E384-05a.

Figura 4.8 – Microdureza Vickers: a) amostra comprimida à 200°C; b) amostra comprimida à 400°C;



Fonte: a autora (2023)

$$HV = 1854,4 \frac{P}{d^2} \quad (4.1)$$

Onde  $HV$  é a dureza Vickers,  $P$  é a carga aplicada em kgf e  $d$  é a média das diagonais em  $\mu\text{m}$ .

#### 4.3.4 Análise superficial

A análise superficial foi realizada a fim de observar o desgaste das amostras após o ensaio de compressão de anel e ensaio de torneamento. A preparação do anel, da matriz e do inserto consistiu na limpeza das superfícies com álcool etílico. As análises qualitativas foram obtidas por meio de imagens via MO, MEV e EDS.

A rugosidade  $R_a$  foi medida usando de perfil de rugosidade R, com filtro Gauss. O valor de comprimento de *Cutoff* ( $\lambda_c$ ) e ( $\lambda_s$ ) igual a 0,25 mm e 1,25 mm respectivamente. A velocidade de varredura usada foi de 0,25 mm/s.

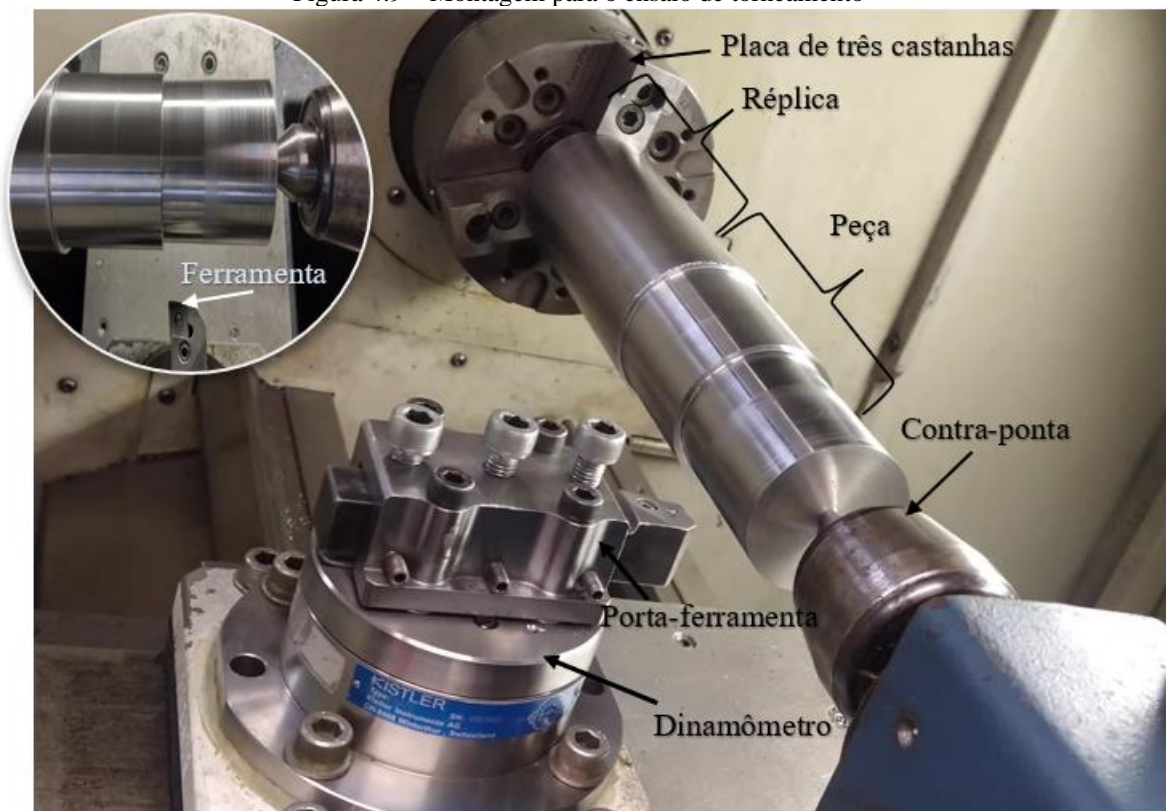
#### 4.3.5 Ensaio de torneamento

A montagem para realizar o ensaio de torneamento, bem como o método para aquisição das forças de usinagem são descritas neste tópico.

##### 4.3.5.1 Montagem

O ensaio de torneamento foi realizado à seco. O tarugo foi fixado pela placa de três castanhas e pela contra ponta. A montagem do porta-ferramenta foi realizada sobre o dinamômetro. A montagem para o ensaio de torneamento é apresentada na Figura 4.9.

Figura 4.9 – Montagem para o ensaio de torneamento



Fonte: a autora (2023)

Foi realizado o levantamento de dados de temperatura de corte em trabalhos acadêmicos. A Tabela 4.3 apresenta o material utilizado, parâmetros de corte, temperatura e método de medição de acordo com o trabalho dos respectivos autores.

Tabela 4.3 – Parâmetros segundo trabalhos acadêmicos

Autores	Material / Ferramenta de corte	Parâmetros de corte			Temperatura (°C)	Método de medição da temperatura
		$v_c$ (m.min <sup>-1</sup> )	$f$ (mm.rev <sup>-1</sup> )	$a_p$ (mm)		
Kumar, Zeman e Polcar (2020)	AISI1045/WC-Co com TiAlCrN	150; 200; 250;	0,15	0,8	200; 300; 360;	Modelo matemático
Norouzifard e Hamedi (2014)	AISI1045/Metal duro	31,4; 89,2; 125,7;	0,11	0,99	185; 194; 205;	Termopar
Jerold e Kumar (2011)	AISI1045/Metal duro multicamadas	145,1	0,096; 0,143; 0,191;	1	175; 225; 260;	Infravermelho
Ay e Yang (1997)	AISI1045/Metal duro	115,8	0,1	0,25	225	Termopar
Han <i>et al.</i> (2008)	AISI1045 (recozido)/Metal duro	100; 200;	0,1	1	304; 329; 396;	Termopar
Song <i>et al.</i> (2017)	AISI 1045/Metal duro	80	0,1	0,2	400	Infravermelho
Ingraci <i>et al.</i> (2016)	AISI 1045/Metal duro	100	0,2	1	250	Termopar
Han <i>et al.</i> (2008)	AISI 1045/Carbeto KC730	100; 200;	0,1	1,5	304; 363;	Termopar

Fonte: a autora (2023)

Foi assumido avanço de 0,1 mm.rev<sup>-1</sup> e uma profundidade de corte de 1 mm. Foram estabelecidas duas temperaturas de trabalho e para cada uma delas, uma velocidade de corte coerente com a Tabela 4.4. As velocidades e temperaturas de corte, bem como os parâmetros de torneamento se encontram na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Parâmetros de corte

Parâmetros de Corte	Temperatura Associada (°C)	
	200	400
$v_c$ (m.min <sup>-1</sup> )	150	220
$f$ (mm.rev <sup>-1</sup> )	0,1	
$a_p$ (mm)	1	

Fonte: a autora (2023)

#### 4.3.5.2 Aquisição das componentes da força de usinagem

Por meio do dinamômetro, foram captados os sinais de força de corte ( $F_c$ ), força de avanço ( $F_f$ ) e força passiva ( $F_p$ ). Os dados adquiridos durante a usinagem foram filtrados por meio do filtro passa baixa *Butterworth* e converteu-se o sinal de força da unidade de mV para N. Os dados colhidos foram exportados para o *Excel*<sup>®</sup> e foi traçada a curva força em função do tempo. O valor de cada força foi estabelecido pelo valor médio da região de estabilidade da curva.

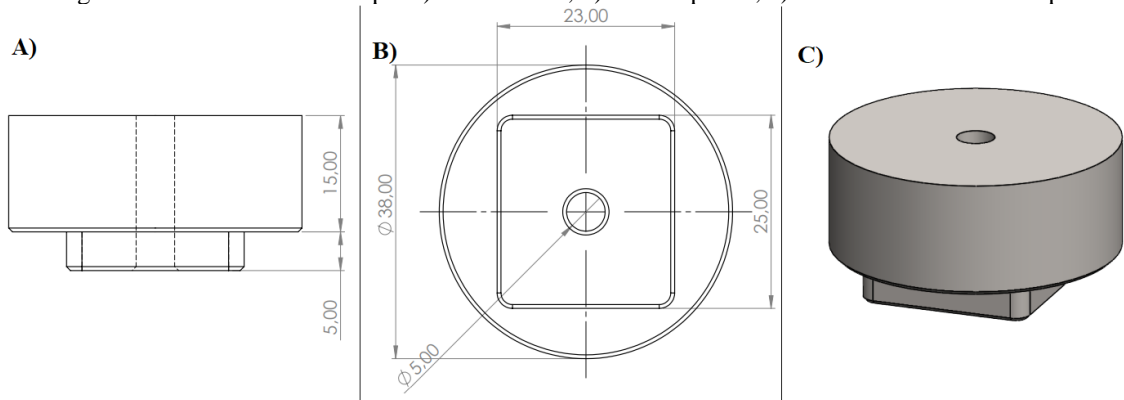
#### 4.3.6 Ensaio de compressão de anel

A fabricação do dispositivo de compressão de anel e o projeto e a montagem do sistema de aquecimento são descritos neste tópico.

##### 4.3.6.1 Dispositivo de compressão de anel

Para o ensaio de compressão de anel foi necessária a fabricação de um dispositivo que acomodasse corretamente as matrizes e o anel, limitando a deformação em até 60% do anel e ainda facilitasse a montagem do sistema no equipamento na prensa hidráulica. O material escolhido foi o aço ABNT H13, visto que é utilizado em trabalhos que envolvem compressão em altas temperaturas. Para garantir a resistência e a tenacidade, é necessário que o material seja tratado com têmpera e duplo revenimento. Antes do tratamento térmico, a barra de aço H13 com 50,8 mm de diâmetro e 70 mm de comprimento foi submetida a usinagem para chegar nas dimensões de projeto. O dispositivo é composto por duas partes: tampa e base. A tampa possui um ressalto com altura suficiente para empregar a deformação desejada e uma altura sobressalente para o encaixe da tampa com a base, evitando o movimento indesejado do conjunto durante o manuseio e a montagem, conforme a Figura 4.10.

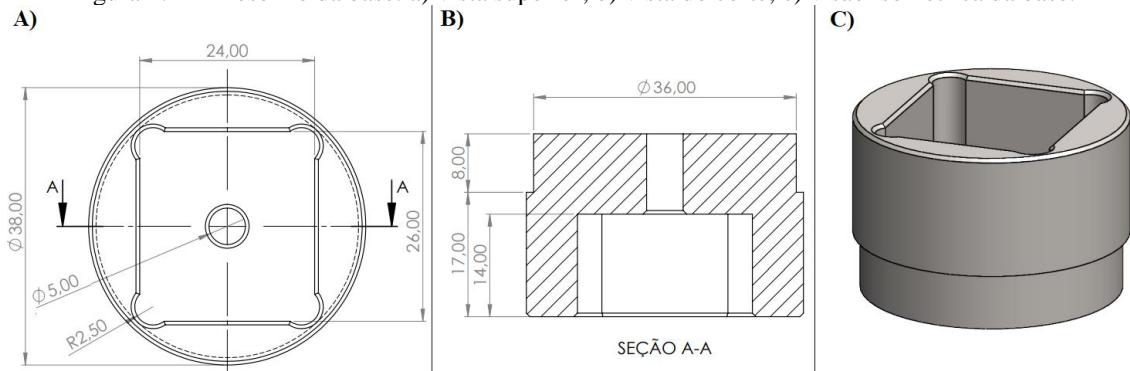
Figura 4.10 - Desenho da tampa: a) vista frontal; b) vista superior; c) visão isométrica da tampa.



Fonte: a autora (2023)

A base, possui um rebaixo para acomodar a matriz inferior, o anel e a matriz superior, conforme Figura 4.11.

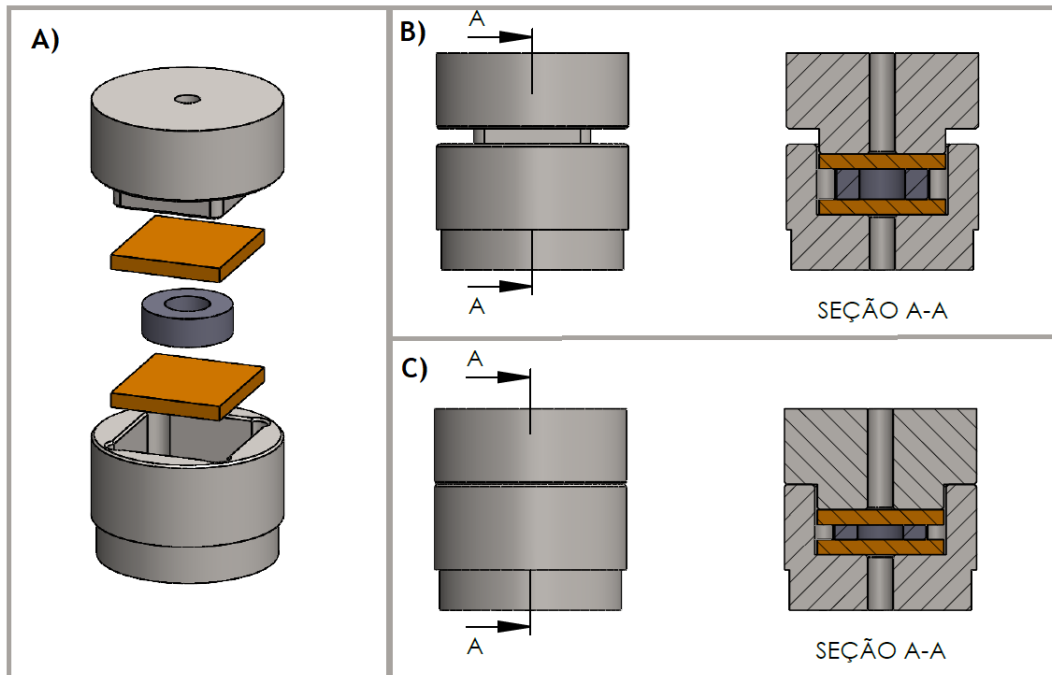
Figura 4.11 - Desenho da base: a) vista superior; b) vista do corte; c) visão isométrica da base.



Fonte: a autora (2023)

A Figura 4.12 mostra a montagem do conjunto dispositivo/matrizes/anel antes e após o ensaio. Quando a base e a tampa do dispositivo estão em contato, as cavidades presentes em ambas as partes são da altura que acomode, as duas matrizes e o anel com a espessura equivalente a uma deformação de 50%, previamente determinada por meio da Equação 2.10.

Figura 4.12 – Montagem do dispositivo, matrizes e anel: a) vista explodida; b) montagem antes do ensaio; c) montagem após o ensaio.



Fonte: a autora (2023)

Após a fabricação, o dispositivo foi submetido ao endurecimento e ao duplo revenimento, como é comumente recomendado (KRAUSS, 2015; ASM, 1995). Para o endurecimento por têmpera, foi realizado o aquecimento do dispositivo até a temperatura de 995 °C e mantido nesta temperatura por 25 minutos. Após este tempo foi resfriado ao ar até alcançar a temperatura ambiente. Em seguida foi submetido a dois ciclos de revenimento, onde aqueceu o dispositivo até 510 °C e foi mantido nesta temperatura por 2 horas. Após transcorrido o tempo, foi resfriado ao ar (ASM, 1995). Após o tratamento térmico foi feita a limpeza do dispositivo com o auxílio de uma lixa 400 e álcool etílico.

#### 4.3.6.2 Projeto do sistema de aquecimento

O sistema de aquecimento do conjunto dispositivo/matriz/anel consiste nos seguintes componentes: resistência elétrica, manta térmica, disjuntor, relé de estado sólido, controlador de temperatura e termopar.

Para aquecer o conjunto dispositivo/matriz/anel foi necessária uma resistência elétrica que se adequasse tanto na forma quanto na potência. Com a Equação 4.2 pode-se calcular a quantidade de calor requerida para o aquecimento a partir da temperatura ambiente (25°C) até

a temperatura máxima de ensaio (400°C), considerando o calor específico do aço igual a 0,460 J/g°C (GARCIA *et al.*, 2017) e a massa do conjunto igual 350 g.

$$Q = c_{aço} \cdot m_{conjunto} \cdot (T_{máx} - T_{amb}) \quad (4.2)$$

Onde  $Q$  é a quantidade de calor,  $c$  é o calor específico do aço,  $m_{conjunto}$  é a massa do conjunto,  $T_{máx}$  e  $T_{amb}$  são a temperatura máxima de operação e temperatura ambiente, respectivamente.

Então, a quantidade de calor requerida para aquecer o conjunto é equivalente a 60,375 kJ. Considerando um tempo de aquecimento de 60 s, a potência mínima para aquecer o conjunto pode ser determinada pela Equação 4.3.

$$Pr = \frac{Q}{t} \quad (4.3)$$

Onde  $Pr$  é a potência requerida em watts,  $t$  é o tempo em segundos.

Portanto, segundo a Equação 4.3, a potência mínima requerida para aquecer o conjunto é equivalente a 1006 W. A resistência elétrica escolhida possui potência igual a 2500 W, considerando eventuais perdas de calor. Quanto a forma da resistência, foi escolhida a resistência cerâmica tipo coleira (Figura 4.13), com 22 cm de diâmetro e 14 cm de altura, sua forma e dimensão permite acomodar o conjunto sem interferir na compressão exercida pela prensa hidráulica.

Figura 4.13 – Resistência cerâmica tipo coleira



Fonte: a autora (2023)

O isolamento da resistência elétrica foi feito por meio de manta que suportasse uma temperatura de 400°C e permitisse moldar no formato da resistência. Então escolheu-se a manta térmica da *FIBERFRAX*<sup>®</sup> modelo Manta Durablanket 1400 por suportar temperaturas até 1400°C, apresentar baixo coeficiente de condutividade térmica à temperatura de 400°C e ser facilmente moldável.

Para o dimensionamento do disjuntor e do relé de estado sólido, foi necessário conhecer a corrente elétrica da resistência elétrica alimentada por uma tensão de 220V. Para isso usou a Equação 4.4.

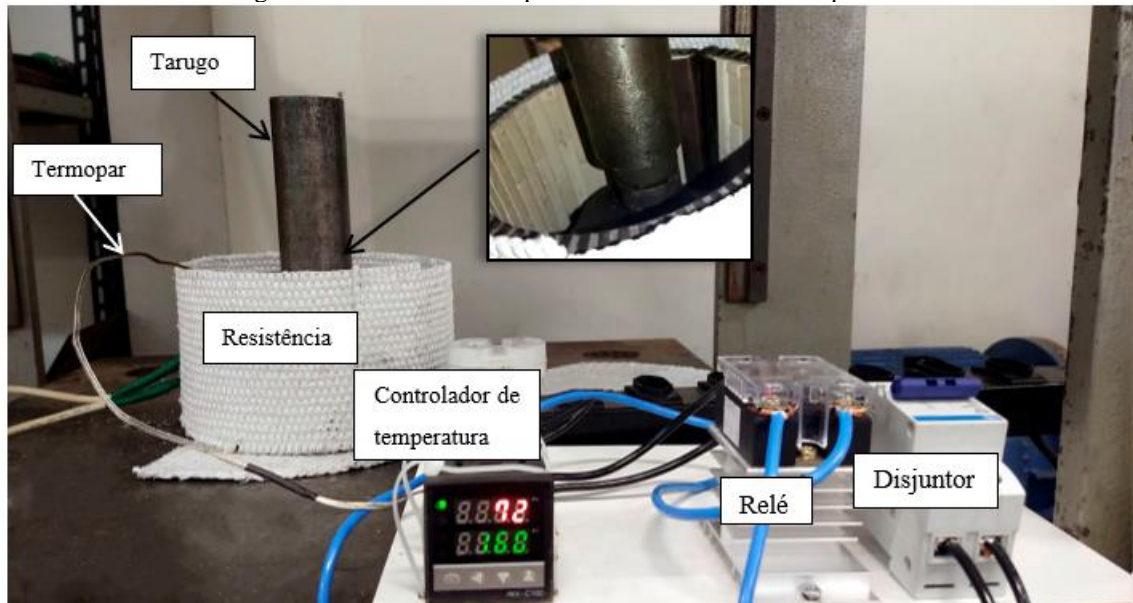
$$Pr = VI \quad (4.4)$$

Onde  $V$  é a tensão em volts e  $I$  é a corrente elétrica em ampères.

Portanto, a corrente máxima exigida pela resistência cerâmica é igual a 11,36 A. O disjuntor e o relé de estado sólido escolhidos suportam correntes de até 50 e 25 A, respectivamente. O controlador de temperatura *REX*<sup>®</sup> modelo C100 e o termopar tipo k, quando atuando juntos, operam em uma faixa de temperatura de 0 a 800°C, conforme indica o fabricante. Tal faixa de temperatura abrange as temperaturas de 200 e 400°C usadas durante o ensaio de compressão de anel.

A montagem do sistema de aquecimento sobre a prensa hidráulica é apresentada na Figura 4.14. O conjunto se encontra na parte interna da resistência cerâmica tipo coleira, conforme indicado na Figura 4.14. Como o conjunto possui altura menor que a altura da resistência cerâmica, foi necessário utilizar um tarugo, posicionado sobre o conjunto. Desta forma, possibilitou a compressão do conjunto sem que a parte superior da prensa encostasse na resistência cerâmica.

Figura 4.14 – Sistema de aquecimento montado sobre a prensa.



Fonte: a autora (2023)

Para a realização da compressão, foi necessário garantir que conjunto chegasse na temperatura de trabalho. Para isso, o termopar era inserido na parte superior do dispositivo e a resistência cerâmica era tampada com a manta térmica, a fim de evitar grandes perdas de calor, assim como mostrado na Figura 4.15b. Após atingir a temperatura, a tampa de manta térmica era retirada, o termopar era substituído pelo tarugo e efetuava-se a compressão. A velocidade de compressão foi de 0,12 m/min com uma pressão de 50 kgf/cm<sup>2</sup>.

Figura 4.15 - Detalhes do sistema de aquecimento: a) vista geral; b) sistema isolado.



Fonte: a autora (2023)

O ensaio de compressão foi realizado em duas temperaturas, 200 e 400°C. Estes valores de temperatura foram os mesmos assumidos na interface ferramenta/cavaco para as velocidades

de 150 e 220 m/min<sup>-1</sup> ensaio de torneamento. Para cada temperatura, foi realizado um teste e 5 réplicas. Após o ensaio, com auxílio de paquímetro, as dimensões de altura, diâmetro externo e interno do anel foram medidas e o valor médio das medições são apresentados na Tabela 5.12 no capítulo 5 “Resultados e Discussão”.

#### *4.3.7 Determinação do coeficiente de atrito*

Este tópico destina-se a descrever a metodologia adotada para determinar o coeficiente de atrito no ensaio de torneamento e no ensaio de compressão de anel.

##### *4.3.7.1 Ensaio de torneamento*

Com os resultados da força de usinagem (força de corte, avanço e passiva) obtidas pelo procedimento experimental, foi possível calcular o coeficiente de atrito para cada teste e réplica. O cálculo foi feito pela Equação 2.3, apresentada na seção 2.2.

##### *3.3.7.2 Ensaio de compressão de anel*

Com as medidas finais dos anéis comprimidos obtidos após o ensaio de compressão, foi possível calcular o coeficiente de atrito para cada respectivo teste e réplica. Para o cálculo do coeficiente de atrito, primeiro foi necessário identificar o  $R_n$ , dado pela Equação 2.5. Com base no resultado, o cálculo da constante do fator de atrito se deu pela Equação 2.7. Por fim, o cálculo de coeficiente de atrito foi feito pela Equação 2.8.

#### *4.3.8 Análise estatística*

Para verificar se o coeficiente de atrito obtido pelo ensaio de torneamento é equivalente ao coeficiente de atrito do ensaio de compressão recorreu-se a uma análise estatística. Portanto, foi proposto a comparação de duas médias onde as amostras são independentes. Neste contexto, foram testadas combinações das condições de ensaio dos dois testes realizados experimentalmente.

Para isso, primeiramente verificou-se a normalidade dos dados. O resultado de normalidade foi verificado ao nível de significância de 1%. Então verificou-se a igualdade de

variâncias por meio do teste de igualdade de variâncias, para uma significância de 5%. A partir da confirmação das igualdades entre as variâncias, aplicou-se o teste t para duas amostras independentes, com nível de significância de 5%. Foi aplicado um teste bilateral, onde adotou-se a hipótese nula ( $H_0$ ) como a hipótese onde não há diferença significativa entre as médias analisadas e a hipótese alternativa ( $H_1$ ) como a hipótese que as médias são diferentes entre si. Para fins de análise, foi usado os resultados do intervalo de confiança (IC), *valor-T* e o *p-valor*. Os resultados que não continham o valor zero no intervalo de confiança, o *valor-T* fora da região de aceitação de  $H_0$  e apresentavam *p-valor* < 0,05, aceitavam-se a hipótese alternativa em detrimento da hipótese nula, afirmando com um nível de significância de 5% que as médias do coeficiente de atrito são diferentes entre si.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo destina-se a apresentar os resultados obtidos por meio dos ensaios de caracterização dos materiais e dos procedimentos experimentais realizados neste trabalho. O objetivo principal deste capítulo é caracterizar o aço ABNT 1045, segundo suas características químicas, microestruturais e mecânicas. Assim como analisar o desgaste provocado nos anéis, matrizes e insertos. Sobretudo, determinar o coeficiente de atrito obtido dos ensaios de compressão de anel e ensaio de torneamento analisando estatisticamente a compatibilidade dos resultados.

### 5.1 Composição química

A fim de confirmar se o aço adquirido para a fabricação dos anéis e do tarugo se tratava do aço ABNT 1045, foi realizado o ensaio para determinar a composição química. O resultado é apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Composição do aço ABNT 1045 adquirido (% peso)

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Cu	Ti	V	As	N
98,45	0,459	0,217	0,685	0,024	0,010	0,021	0,005	0,027	0,001	0,001	0,009	0,007

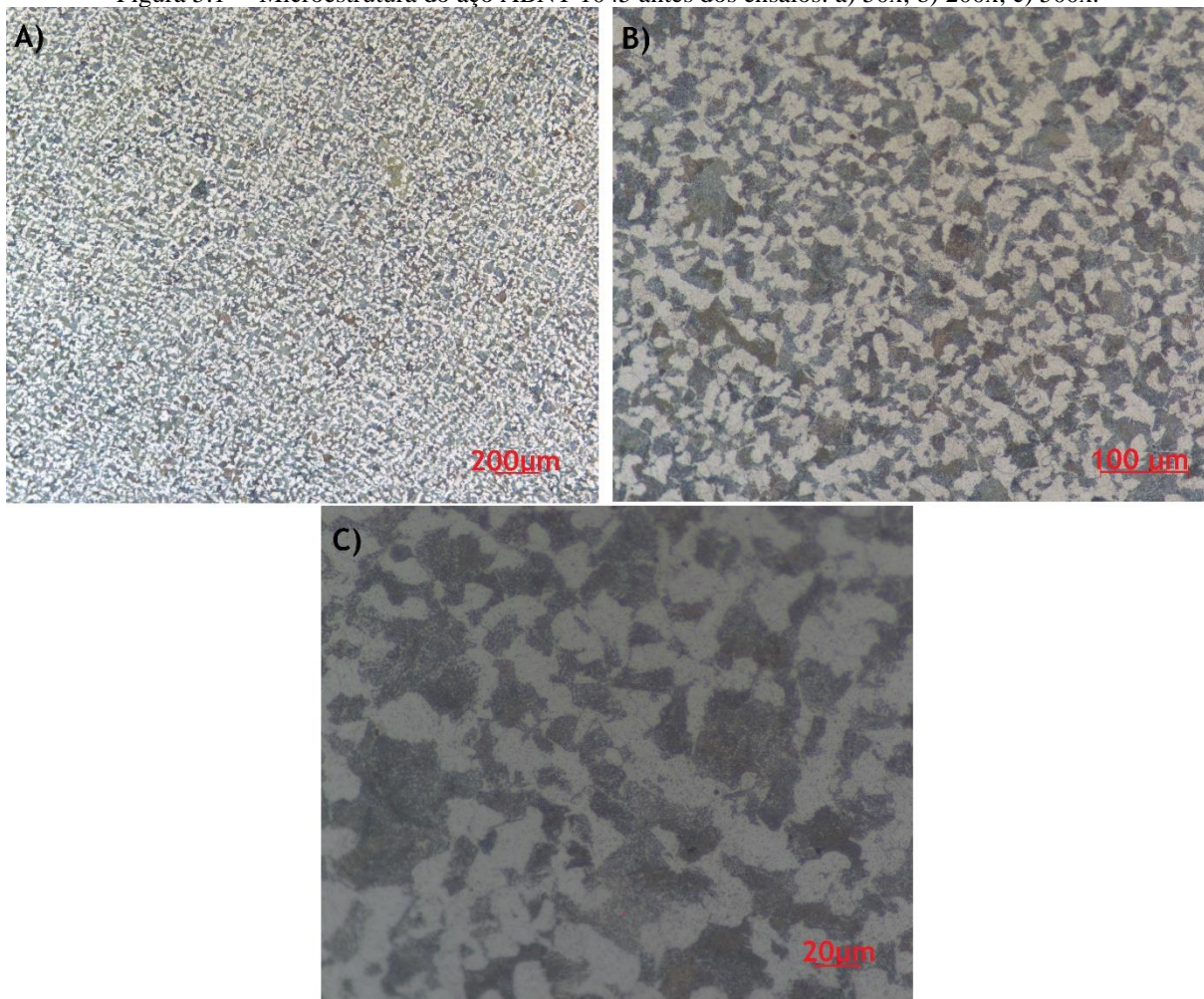
Fonte: a autora (2023)

Os valores encontrados de carbono, manganês, fósforo e enxofre se enquadram na faixa característica do aço ABNT 1045 (ASM, 1995; ASTM, 2015). Segundo ASTM A311/A311M (2015) os demais elementos como cromo, alumínio, cobre e titânio podem ser estipulados por meio de acordo entre o comprador e fabricante.

### 5.2 Análise microestrutural

Foram realizadas imagens via MO, a fim de investigar a microestrutura do aço ABNT 1045 utilizado para a fabricação dos anéis usados no ensaio de compressão de anel e do tarugo usado no ensaio de torneamento. A microestrutura antes dos ensaios é apresentada na Figura 5.1, onde apresenta imagens com ampliações de 50, 200 e 500x.

Figura 5.1 – Microestrutura do aço ABNT 1045 antes dos ensaios: a) 50x; b) 200x; c) 500x.

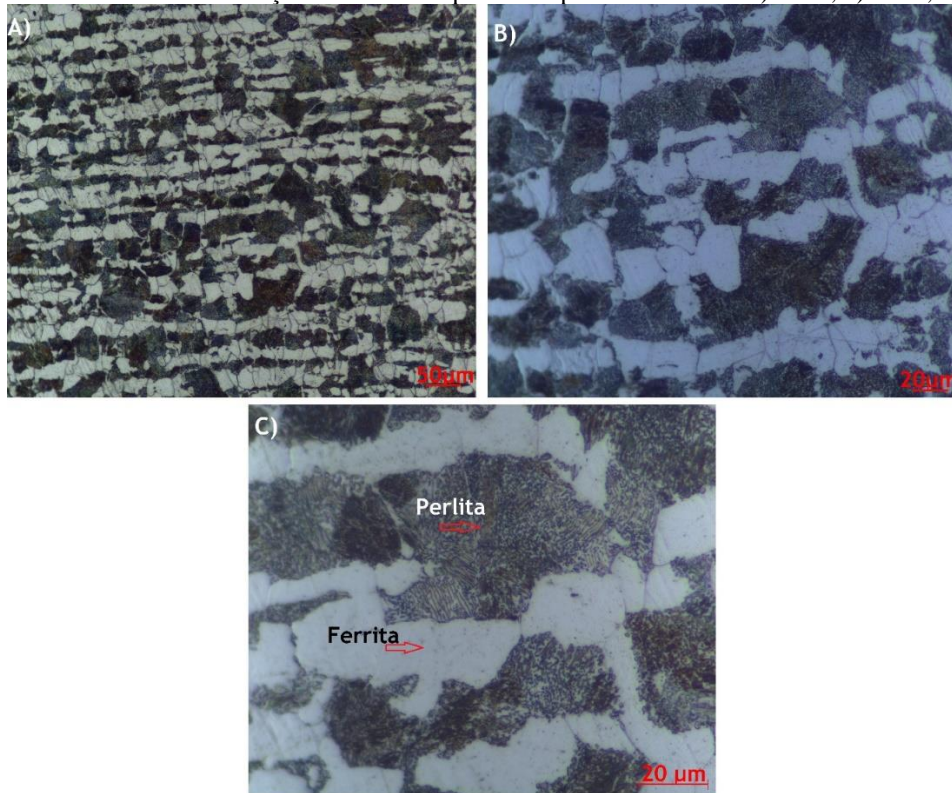


Fonte: a autora (2023)

O aço ABNT 1045 apresenta microestrutura compatível para aços de médio teor de carbono que passaram pelo tratamento térmico de recozimento, ou seja, foram aquecidos acima da temperatura  $727\text{ }^{\circ}\text{C}$  e resfriadas lentamente. Na Figura 5.1 é possível observar grãos de ferrita (parte branca) e perlita (parte escura).

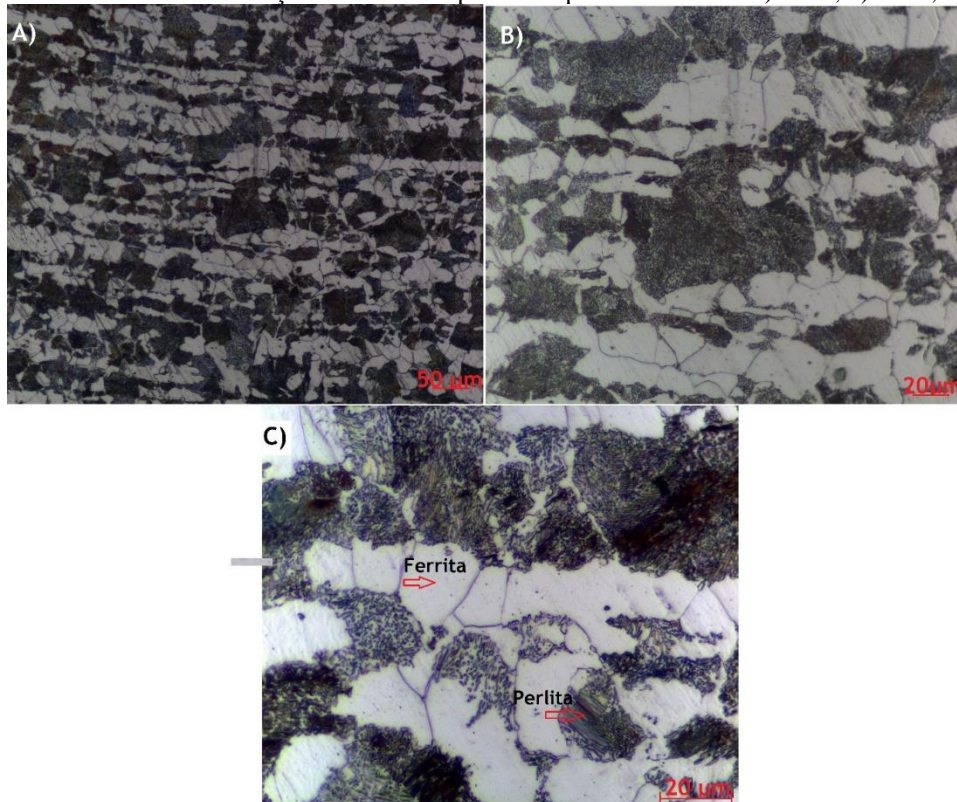
A microestrutura do anel ABNT 1045, foi avaliada após o ensaio de compressão. A Figura 5.2 e 5.3 apresenta a microestrutura do anel comprimido à  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectivamente.

Figura 5.2 – Microestrutura do aço ABNT 1045 após a compressão à 200°C: a) 200x; b) 500x; c) 1000x.



Fonte: a autora (2023)

Figura 5.3 – Microestrutura do aço ABNT 1045 após a compressão à 400°C: a) 200x; b) 500x; c) 1000x.



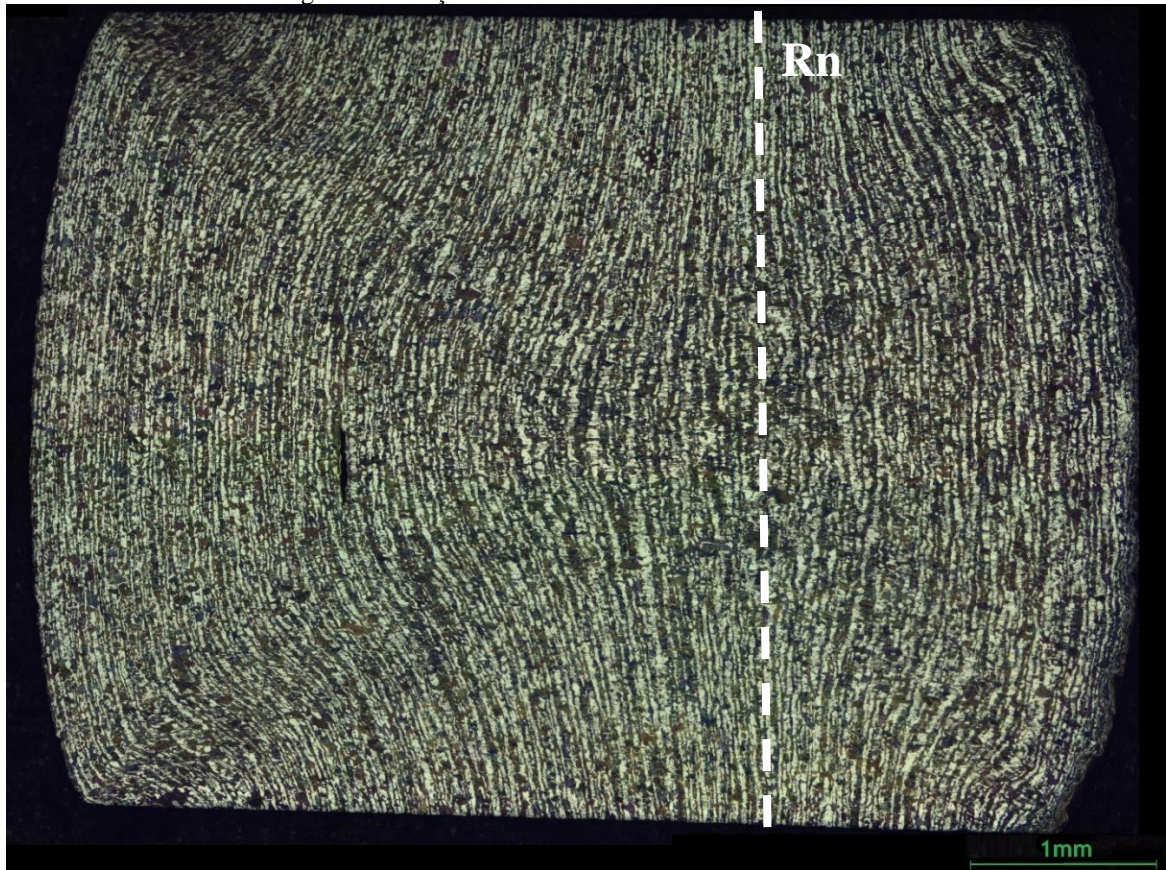
Fonte: a autora (2023)

Conforme as Figuras 5.2 e 5.3, não houve mudança de fase induzida pela deformação. A ferrita e a perlita (lamelas de ferrita e cementita) podem ser vistas claramente nas Figuras 5.2c e 5.3c, conforme destacado em cada uma.

A mudança da geometria do anel decorrente do ensaio de compressão é resultado da deformação plástica. Durante a deformação, os grãos se movimentam de maneira não uniforme em diferentes as regiões do anel, dependendo das condições de atrito interfacial (DESALEGN, DAVIDSON e KHANRA, 2014; DUTTON *et al.*, 1999; WOLLA, DAVIDSON e KHANRA, 2016). O raio neutro ( $R_n$ ) é onde a velocidade do fluxo de material é igual ou próxima de zero, e o deslocamento dos grãos acontece a partir do raio.

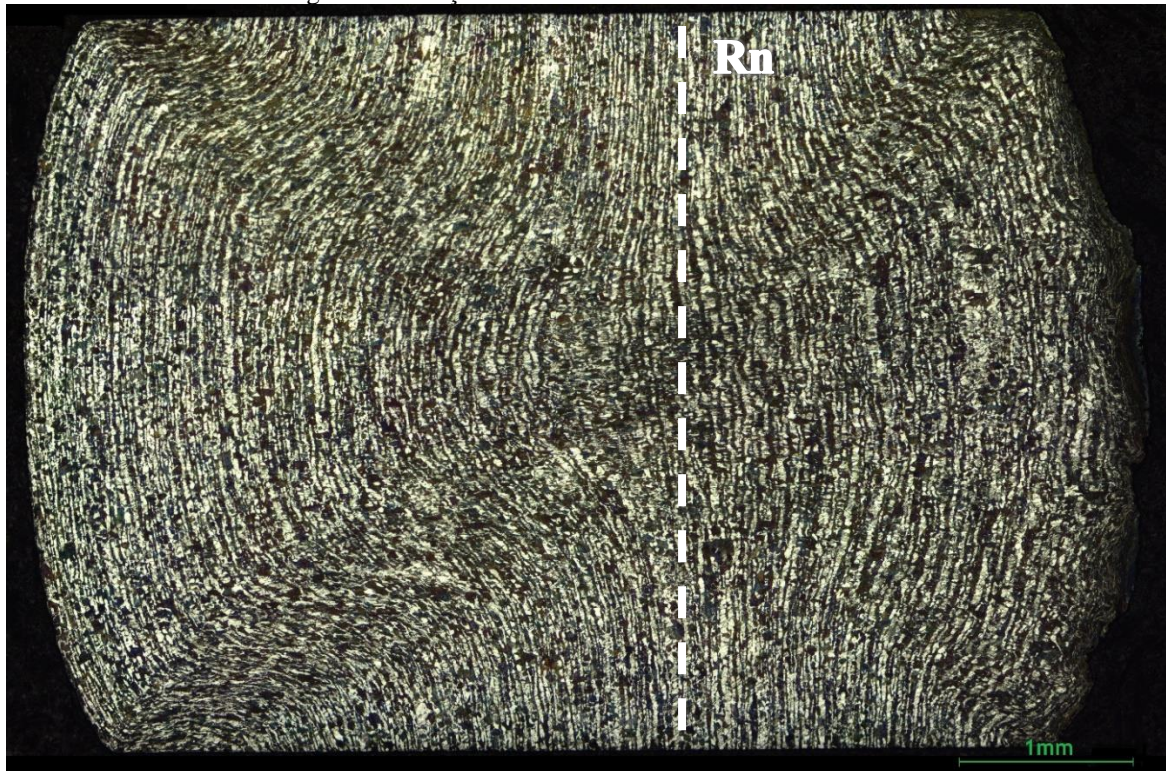
Foram feitas imagens via MO da seção transversal dos anéis após a deformação a fim de avaliar o fluxo do metal. Com ampliação de 50x e com microestrutura revelada por meio de ataque químico, as Figuras 5.4 e 5.5 apresentam a seção transversal do anel comprimido à 200 e 400°C, respectivamente. O lado direito da seção transversal apresentada nas Figuras 5.4 e 5.5 é a parte interna do anel. Segundo Wolla, Davidson e Khanra (2016), o aumento da temperatura do ensaio de compressão aumenta o fluxo de material preferencialmente em direção ao diâmetro interno do anel. Pode-se observar que a linha do raio neutro ( $R_n$ ) do anel à 400°C está mais distante do diâmetro interno que a amostra do anel à 200°C.

Figura 5.4– Seção transversal do anel deformado à 200°C



Fonte: a autora (2023)

Figura 5.5 – Seção transversal do anel deformado à 400°



Fonte: a autora (2023)

### 5.3 Dureza

Os valores da dureza Vickers da seção transversal do aço ABNT 1045 antes e após o ensaio de compressão são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Dureza Vickers do aço ABNT 1045 antes e após o ensaio de compressão de anel.

	Antes	Após o ensaio de compressão de anel	
		200°C	400°C
<b>Dureza Vickers (HV30)</b>	210 ± 5	260 ± 7	247 ± 9

Fonte: a autora (2023)

Observou-se por meio dos resultados que as temperaturas de 200 e 400°C foram suficientes para o encruamento do material, resultando no aumento da dureza. No entanto, não houve diferença significativa na dureza entre as amostras comprimidas à 200 e a 400°C.

Foi realizado o teste de microdureza ao longo da seção transversal após o ensaio de compressão a quente nas regiões observadas na Figura 5.6. Os valores médios com seus respectivos desvio-padrões são apresentados pela Tabela 5.3. Conforme observado, a temperatura do ensaio não alterou significativamente os valores de dureza da ferrita e da perlita. Maruda *et al.* (2016) avaliaram o perfil de microdureza da ferrita e perlita do aço AISI 1045 após deformação plástica subsequente a exposição a altas temperaturas. Não foi observada alteração significativa da microdureza ao longo da seção transversal.

Figura 5.6 – Endentações na seção transversal do anel



Fonte: a autora (2023)

Tabela 5.3 – Perfil de microdureza da seção transversal do anel

Temperatura (°C)	Dureza (HV0,2)					
	Região 1		Região 2		Região 3	
	Ferrita	Perlita	Ferrita	Perlita	Ferrita	Perlita
200	197 ± 7	247 ± 7	193 ± 11	236 ± 17	210 ± 6	253 ± 10
400	200 ± 14	258 ± 13	193 ± 19	230 ± 13	214 ± 6	267 ± 13

Fonte: a autora (2023)

## 5.4 Análise superficial

Foi realizado uma análise da superfície do anel, matriz e ferramenta de corte, a fim de verificar o efeito e os mecanismos de desgaste provocados pelos ensaios de torneamento e compressão sobre estes materiais.

### 5.4.1 Anel

Os resultados da rugosidade Ra dos anéis, antes e depois do processo são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Rugosidade Ra da face dos anéis antes e depois do ensaio de compressão

Anel	Antes		Depois	
	Média e desvio-padrão ( $\mu\text{m}$ )	Temperatura do ensaio ( $^{\circ}\text{C}$ )	Média e desvio-padrão ( $\mu\text{m}$ )	
1	$0,064 \pm 0,02$	200	$0,552 \pm 0,213$	
2	$0,054 \pm 0,011$		$0,393 \pm 0,080$	
3	$0,052 \pm 0,008$		$0,371 \pm 0,239$	
4	$0,060 \pm 0,008$		$0,227 \pm 0,034$	
5	$0,047 \pm 0,014$		$0,221 \pm 0,019$	
6	$0,054 \pm 0,007$		$0,444 \pm 0,035$	
7	$0,070 \pm 0,014$	400	$0,340 \pm 0,009$	
8	$0,042 \pm 0,006$		$0,440 \pm 0,024$	
9	$0,048 \pm 0,006$		$0,425 \pm 0,087$	
10	$0,054 \pm 0,022$		$0,615 \pm 0,188$	
11	$0,047 \pm 0,010$		$0,183 \pm 0,014$	
12	$0,059 \pm 0,013$		$0,142 \pm 0,026$	

Fonte: a autora (2023)

Para atestar se houve aumento significativo da rugosidade depois do ensaio de compressão, foi realizado o teste t para amostras pareadas para um nível de significância de 5%. Com isso, observou-se aumento significativo na rugosidade superficial do anel em razão da compressão, apresentando um  $p\text{-valor}=0,000$ , conforme apresentado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Rugosidade Ra dos anéis antes e depois do processo de compressão

	<b>Antes</b>	<b>200°C</b>	<b>400°C</b>	<b>Teste de Hipótese</b> <b>H1: <math>\mu_1 - \mu_2 &lt; 0</math></b>
Ra ( $\mu\text{m}$ )	0,054 $\pm$ 0,001	0,368 $\pm$ 0,128	0,357 $\pm$ 0,176	<i>p</i> -valor: 0,000

Fonte: a autora (2023)

A fim de verificar se a temperatura de ensaio influenciou diretamente na rugosidade das amostras, foi realizado o teste t para duas amostras para um nível de significância de 5% assumindo igualdade entre as variâncias. De acordo com o *p*-valor apresentado na Tabela 5.6, pode-se afirmar que a temperatura de ensaio não influenciou na rugosidade.

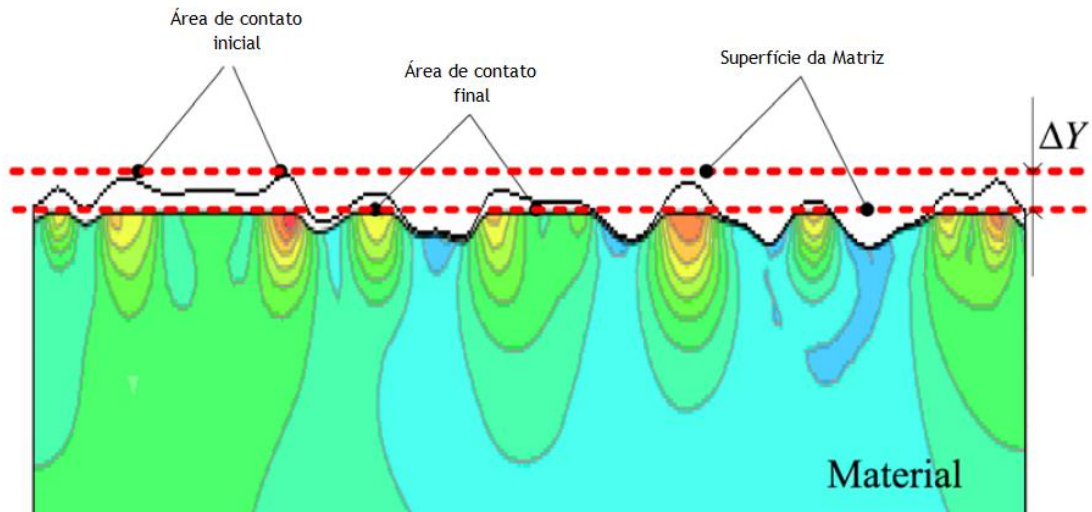
Tabela 5.6 – Rugosidade Ra dos anéis em razão da temperatura de ensaio de compressão de anel

	<b>200°C</b>	<b>400°C</b>	<b>Teste de Hipótese:</b> <b>H1: <math>\mu_1 - \mu_2 \neq 0</math></b>
Ra ( $\mu\text{m}$ )	0,368 $\pm$ 0,128	0,357 $\pm$ 0,176	<i>p</i> -valor: 0,908

Fonte: a autora (2023)

A área de contato real entre a matriz e o anel é menor do que a área de contato aparente, devido a rugosidade presente nas superfícies. Durante o ensaio de compressão de anel, a força aplicada sobre o anel deforma plasticamente os picos das asperezas da superfície do anel. Segundo Peng *et al.* (2010) a superfície da ferramenta, ou seja, a matriz, pode ser considerada lisa e rígida o suficiente para não se deformar durante a compressão. Os picos das asperezas da superfície do anel sustentam inicialmente toda a força aplicada. Como o ensaio de compressão não utilizou lubrificante, os vales das asperezas não são preenchidos. Estes vales também são conhecidos como *open lubricant pockets* (OPL). Então, somente os picos das asperezas deformam plasticamente até se tornarem planos, com isso aumenta a área de contato real (CHAN, FU e LU, 2011), conforme ilustrado na Figura 5.7.

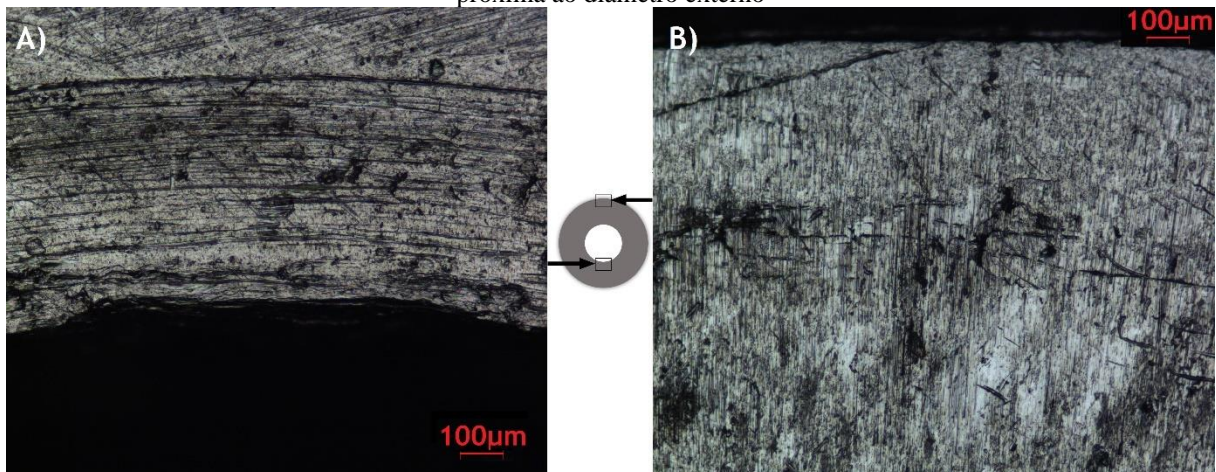
Figura 5.7 – Desenvolvimento da área de contato do anel durante a compressão



Fonte: adaptado e traduzido de Peng *et al.* (2010)

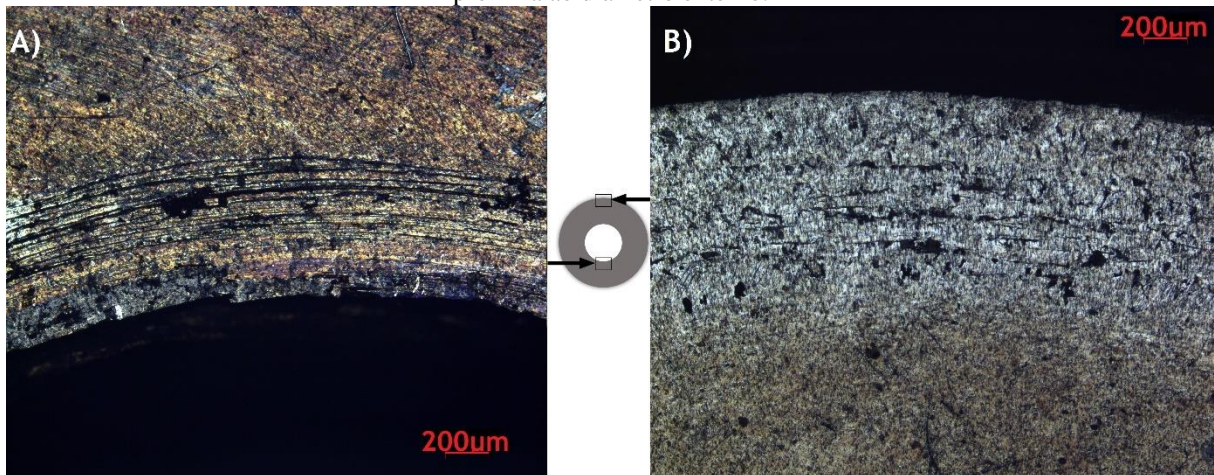
A superfície dos anéis foi avaliada depois do ensaio de compressão. Foram feitas imagens via MO na superfície dos anéis conformados nas temperaturas de 200 e 400°C, nas regiões próximas ao diâmetro interno e externo. As imagens obtidas com ampliações de 50 e 100x são apresentadas nas Figuras 5.8 e 5.9, que correspondem aos anéis conformados à 200 e 400°C, respectivamente.

Figura 5.8 – Imagem de MO do anel conformado à 200°C: a) região próxima ao diâmetro interno; b) região próxima ao diâmetro externo



Fonte: a autora (2023)

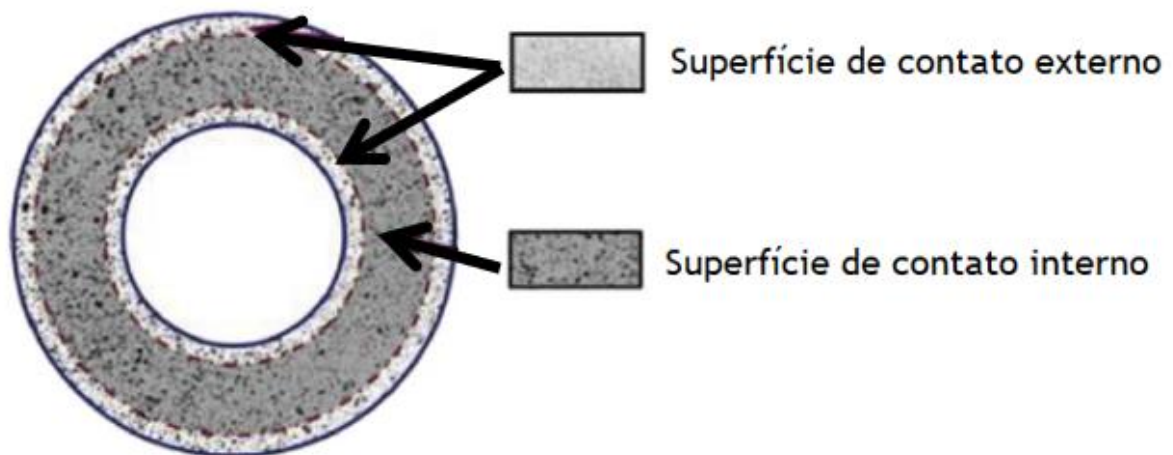
Figura 5.9 – Imagem de MO do anel conformado à 400°C: a) região próxima ao diâmetro interno; b) região próxima ao diâmetro externo.



Fonte: a autora (2023)

Nota-se nas Figuras 5.8 e 5.9, ranhuras com padrão circular que acompanham o perímetro interno e externo do anel. Estas ranhuras são a razão pela qual a rugosidade dos anéis aumentaram significativamente depois do ensaio de compressão. Segundo Bao *et al.* (2020), depois da conformação do anel, a área de contato do anel com a matriz pode ser definida como superfície de contato interno e superfície de contato externo, como mostra a Figura 5.10.

Figura 5.10 – Superfície de contato externo e interno do anel



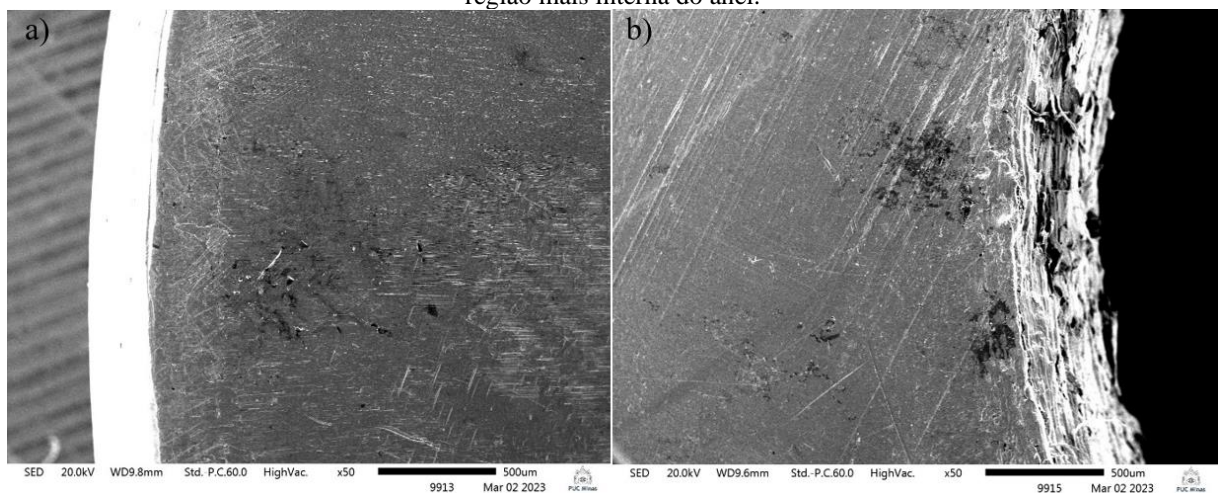
Fonte: adaptado e traduzido de Bao *et al.* (2020)

As ranhuras observadas nas Figuras 5.8 e 5.9 correspondem, segundo Bao *et al.* (2020), Chan, Fu e LU (2011) e Engel (2006), à superfície de contato externo. Uma região característica onde concentram-se os OLPs, ou seja, vales que não foram deformados. Segundo Zhang, Yang e Zhao (2020), em uma deformação com pouca ou sem lubrificação, estas ranhuras são

provocadas pela ferramenta mais dura que sulca a superfície do anel mais macio, produzindo uma espécie de ranhuras desiguais, profundas e densamente arranjadas. Matsumoto *et al.* (2019) realizaram o ensaio de compressão no aço AISI 1025 com camada de óxido de ferro (FeO) controlada. O ensaio foi feito na temperatura de 1223 K e após a compressão foi analisada a superfície do anel. Matsumoto *et al.* (2019) observaram que a camada de FeO, por ser frágil, apresentou várias fissuras ao longo da superfície do anel e estes foram achatados durante a compressão, formando sulcos na superfície. Desta forma, as ranhuras podem ser formadas por um ou mais mecanismos.

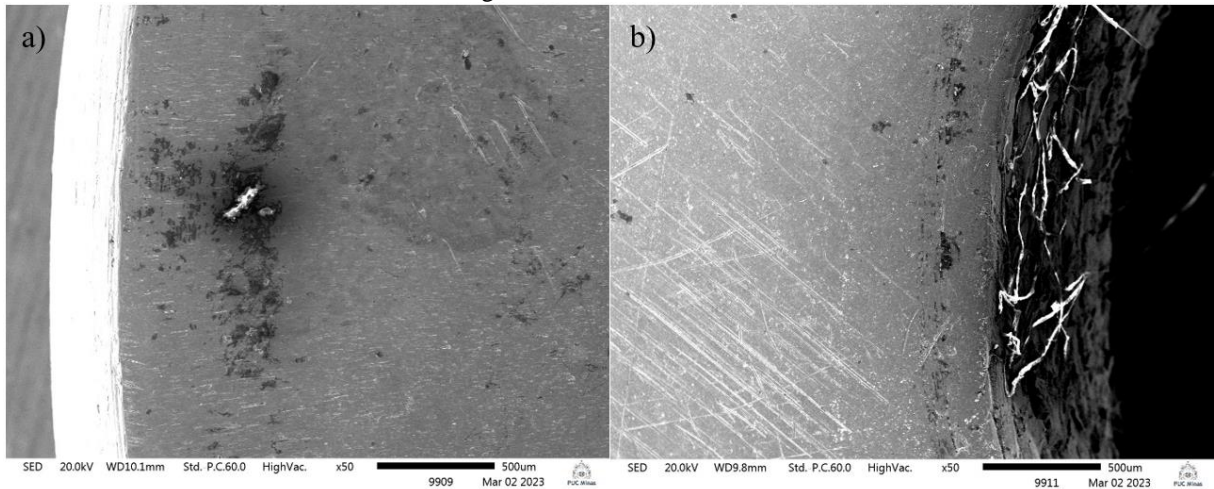
As Figuras 5.11 e 5.12 apresentam as imagens de MEV das superfícies do anel comprimido à 200 e 400°C, respectivamente. As Figuras 5.11a e 5.12a mostram a região mais externa do anel, enquanto as Figuras 5.11b e 5.12b apresentam as regiões mais internas. Pode-se observar que as imagens apresentam regiões escurecidas sobre a superfície dos anéis.

Figura 5.11 – Imagens de MEV da superfície do anel comprimido à 200°C: a) região mais externa do anel; b) região mais interna do anel.



Fonte: a autora (2023)

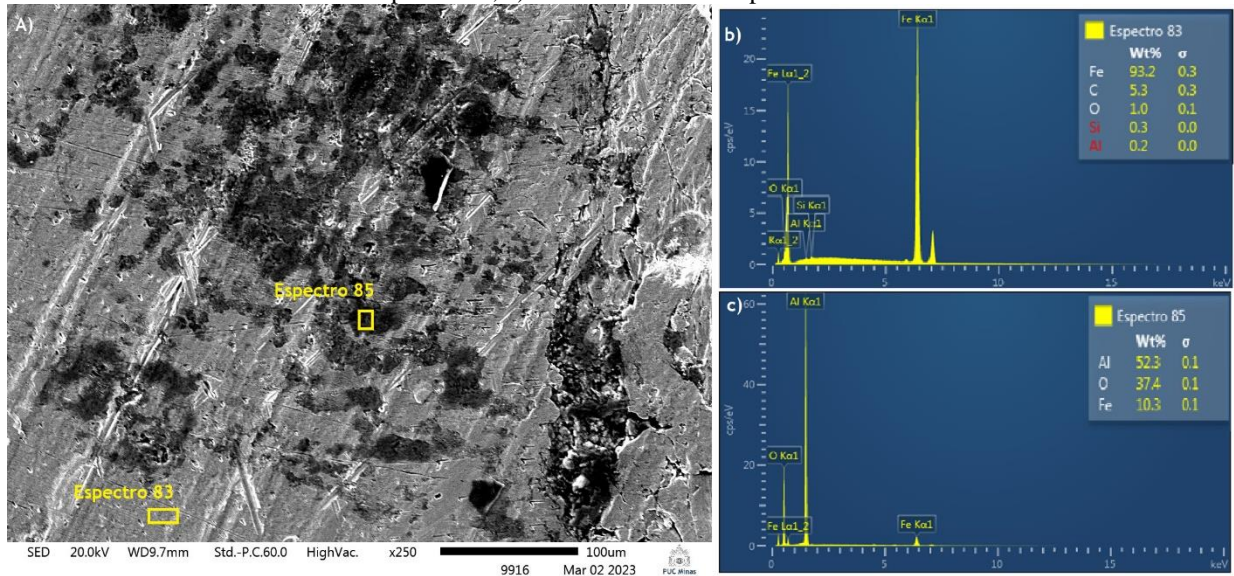
Figura 5.12 – Imagens de MEV da superfície do anel comprimido à 400°C: a) região mais externa do anel; b) região mais interna do anel.



Fonte: a autora (2023)

As Figuras 5.13 e 5.14 apresentam ampliações de 250x dessas regiões, juntamente com análise de EDS. Na Figura 5.13, o espectro 83 (Figura 5.13b) que abrange uma região cinza, a espectroscopia aponta a presença dos elementos de ferro, carbono, oxigênio e valores residuais de silício e alumínio. Estes elementos químicos são compatíveis ao material do anel, conforme análise química apresentada anteriormente na Tabela 5.1. No espectro 85 (Figura 5.13c) que abrange uma região escurecida aponta a presença dos elementos químicos de alumínio, oxigênio e ferro. Nota-se um percentual de alumínio e oxigênio alto, enquanto o ferro e o cromo apresentam valores residuais. Devido a concentração do alumínio e do oxigênio é possível que seja o produto de oxidação e/ou adesão do revestimento AlCrN da matriz.

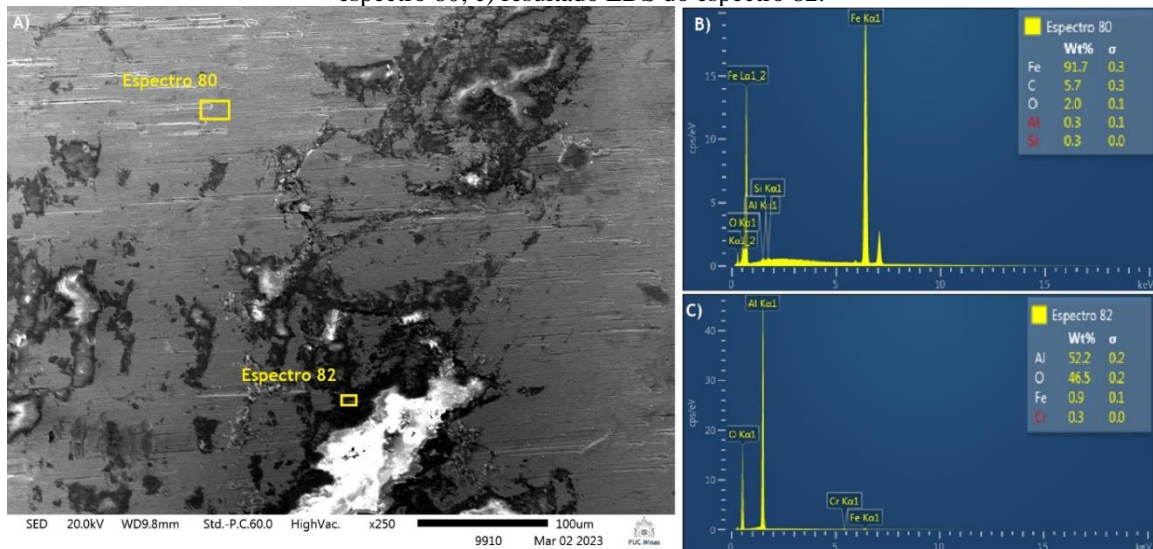
Figura 5.13 – Análise superficial do anel comprimido à 200°C: a) imagem via MEV; b) resultado EDS do espectro 83; c) resultado EDS do espectro 85.



Fonte: a autora (2023)

Na Figura 5.14, o espectro 80 abrange uma área cinza mais uniforme e pelo resultado da espectroscopia (Figura 5.14b), pode-se observar os mesmos elementos químicos e com concentrações próximas ao encontrado no anel comprimido a 200°C, conforme Figura 5.13, indicando que os elementos sejam oriundos do próprio material do anel. O espectro 82 abrange uma região escurecida e pelo resultado da espectroscopia (Figura 5.14c) aponta alta concentração de alumínio e oxigênio e valores residuais de ferro e cromo indicando uma possível oxidação e/ou adesão do revestimento AlCrN da matriz.

Figura 5.14 – Análise superficial do anel comprimido à 400°C: a) imagem via MEV; b) resultado EDS do espectro 80; c) resultado EDS do espectro 82.



Fonte: a autora (2023)

### 5.4.2 Matriz

A rugosidade das matrizes também foi observada. A Tabela 5.7 apresenta os valores referentes a rugosidade Ra da face das amostras, antes e depois do ensaio de compressão.

Tabela 5.7 – Rugosidade Ra da face das matrizes antes e depois do ensaio de compressão de anel

Matriz	Par	Antes	Depois
		Média e desvio-padrão ( $\mu\text{m}$ )	Média e desvio-padrão ( $\mu\text{m}$ )
1	1	0,059 $\pm$ 0,032	0,073 $\pm$ 0,010
2		0,061 $\pm$ 0,023	0,076 $\pm$ 0,036
3	2	0,062 $\pm$ 0,018	0,106 $\pm$ 0,051
4		0,057 $\pm$ 0,018	0,068 $\pm$ 0,010
5	3	0,061 $\pm$ 0,030	0,083 $\pm$ 0,019
6		0,060 $\pm$ 0,029	0,070 $\pm$ 0,019
7	4	0,062 $\pm$ 0,033	0,097 $\pm$ 0,015
8		0,070 $\pm$ 0,027	0,076 $\pm$ 0,013
9	5	0,078 $\pm$ 0,025	0,145 $\pm$ 0,027
10		0,061 $\pm$ 0,035	0,092 $\pm$ 0,016
11	6	0,066 $\pm$ 0,031	0,075 $\pm$ 0,010
12		0,059 $\pm$ 0,013	0,073 $\pm$ 0,009
13	7	0,061 $\pm$ 0,030	0,073 $\pm$ 0,010
14		0,051 $\pm$ 0,023	0,058 $\pm$ 0,010
15	8	0,060 $\pm$ 0,031	0,064 $\pm$ 0,012
16		0,069 $\pm$ 0,029	0,075 $\pm$ 0,013
17	9	0,061 $\pm$ 0,028	0,082 $\pm$ 0,013
18		0,059 $\pm$ 0,022	0,063 $\pm$ 0,011
19	10	0,065 $\pm$ 0,012	0,076 $\pm$ 0,014
20		0,067 $\pm$ 0,013	0,071 $\pm$ 0,011
21	11	0,071 $\pm$ 0,017	0,084 $\pm$ 0,013
22		0,079 $\pm$ 0,031	0,105 $\pm$ 0,009
23	12	0,062 $\pm$ 0,009	0,076 $\pm$ 0,011
24		0,068 $\pm$ 0,021	0,079 $\pm$ 0,010

Fonte: a autora (2023)

Da mesma forma que foi feito com os anéis, verificou-se ocorrência de aumento significativo da rugosidade das matrizes depois do ensaio de compressão. Foi realizado o teste t para amostras pareadas para um nível de significância de 5%. Conforme apresentado na Tabela 5.8, houve aumento significativo (*p*-valor igual a 0,000) na rugosidade superficial da matriz em razão da compressão.

Tabela 5.8 – Rugosidade Ra das matrizes antes e depois do ensaio de compressão de anel

	<b>Antes</b>	<b>200°C</b>	<b>400°C</b>	<b>Teste de Hipótese:</b> <b>H<sub>1</sub>: <math>\mu_1 - \mu_2 &lt; 0</math></b>
Ra ( $\mu\text{m}$ )	0,064 $\pm$ 0,006	0,086 $\pm$ 0,022	0,076 $\pm$ 0,013	<i>p</i> -valor: 0,000

Fonte: a autora (2023)

Para verificar se a temperatura de ensaio influenciou diretamente na rugosidade das matrizes, foi realizado o teste t para duas amostras para um nível de significância de 5% assumindo igualdade entre as variâncias. De acordo com o apresentado pela Tabela 5.9, o resultado de um *p*-valor igual a 0,163, pode-se afirmar que a temperatura de ensaio não influenciou na rugosidade das matrizes.

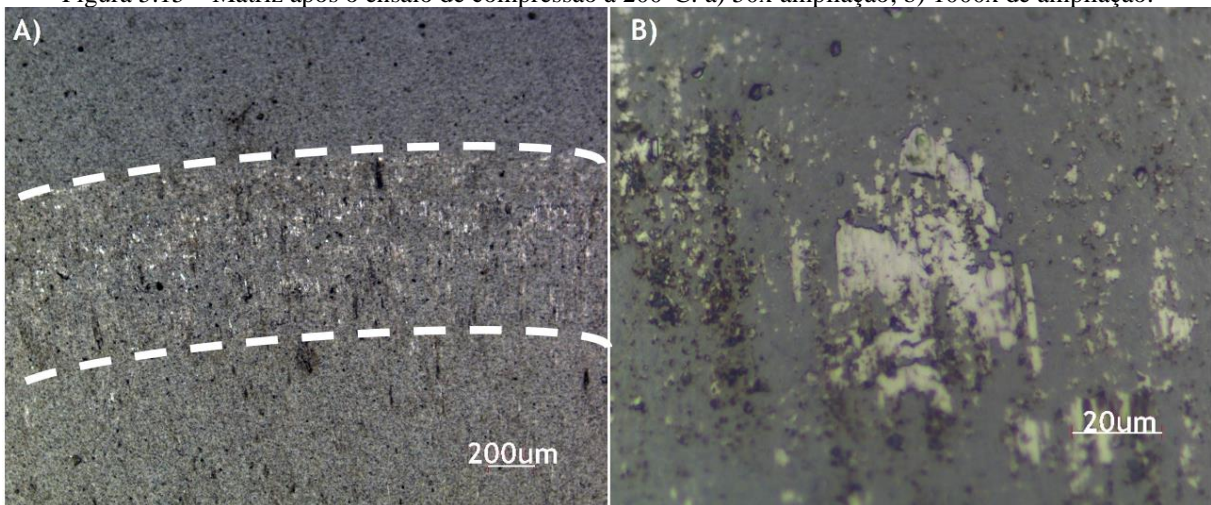
Tabela 5.9 – Rugosidade Ra das matrizes em razão da temperatura de ensaio de compressão de anel

	<b>200°C</b>	<b>400°C</b>	<b>Teste de Hipótese:</b> <b>H<sub>1</sub>: <math>\mu_1 - \mu_2 \neq 0</math></b>
Ra ( $\mu\text{m}$ )	0,086 $\pm$ 0,022	0,076 $\pm$ 0,013	<i>p</i> -valor: 0,163

Fonte: a autora (2023)

Foram realizadas imagens via MO nas matrizes após o ensaio de compressão. Observou-se que a área de contato entre matriz e o anel apresentou uma região de desgaste. A Figura 5.15 apresenta as imagens obtidas via MO da matriz utilizada no ensaio de compressão do anel à 200°C. A Figura 5.15a, com ampliação de 50x, destaca a região de desgaste. A Figura 5.15b apresenta imagem da região de desgaste com ampliação de 1000x.

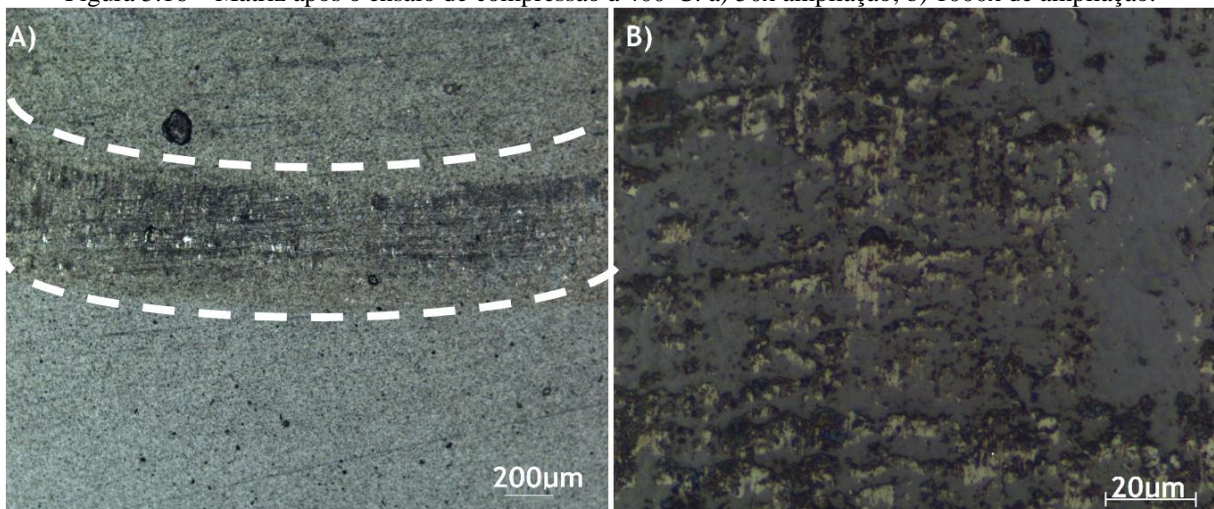
Figura 5.15 – Matriz após o ensaio de compressão à 200°C: a) 50x ampliação; b) 1000x de ampliação.



Fonte: a autora (2023)

Isso também foi observado na matriz utilizada no ensaio de compressão do anel à 400°C, conforme Figura 5.16.

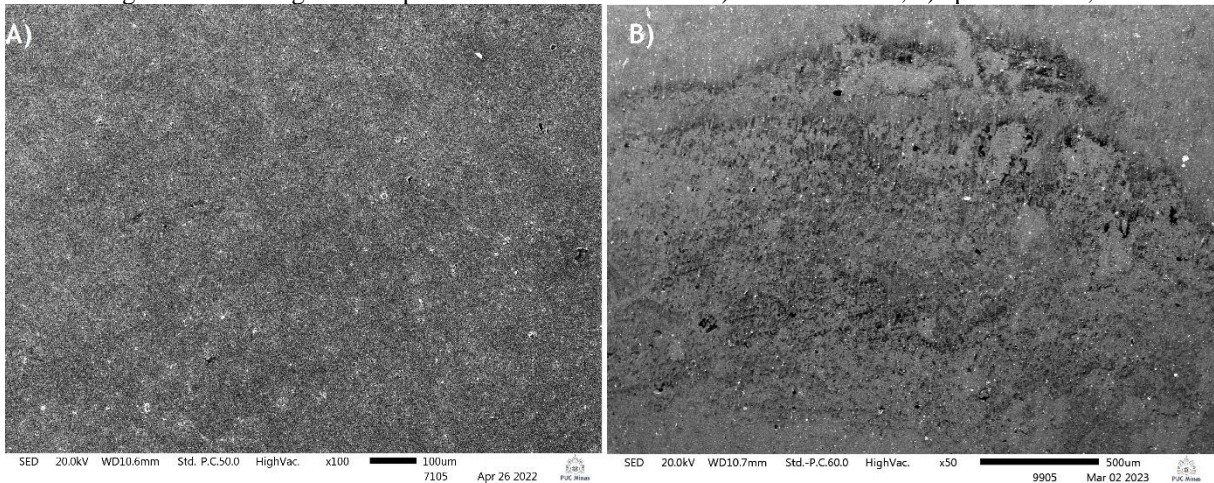
Figura 5.16 – Matriz após o ensaio de compressão à 400°C: a) 50x ampliação; b) 1000x de ampliação.



Fonte: a autora (2023)

A Figura 5.17 apresenta imagens via MEV da superfície da matriz antes e depois do ensaio de compressão do anel. Antes do ensaio, conforme a Figura 5.17a com amplificação de 100x, a superfície da matriz apresenta revestimento de AlCrN com aspecto uniforme. A Figura 5.17b apresenta a matriz após o ensaio de compressão do anel à 400°C, a imagem com amplificação de 50x apresenta áreas escurecidas na região de contrato entre a matriz e o anel.

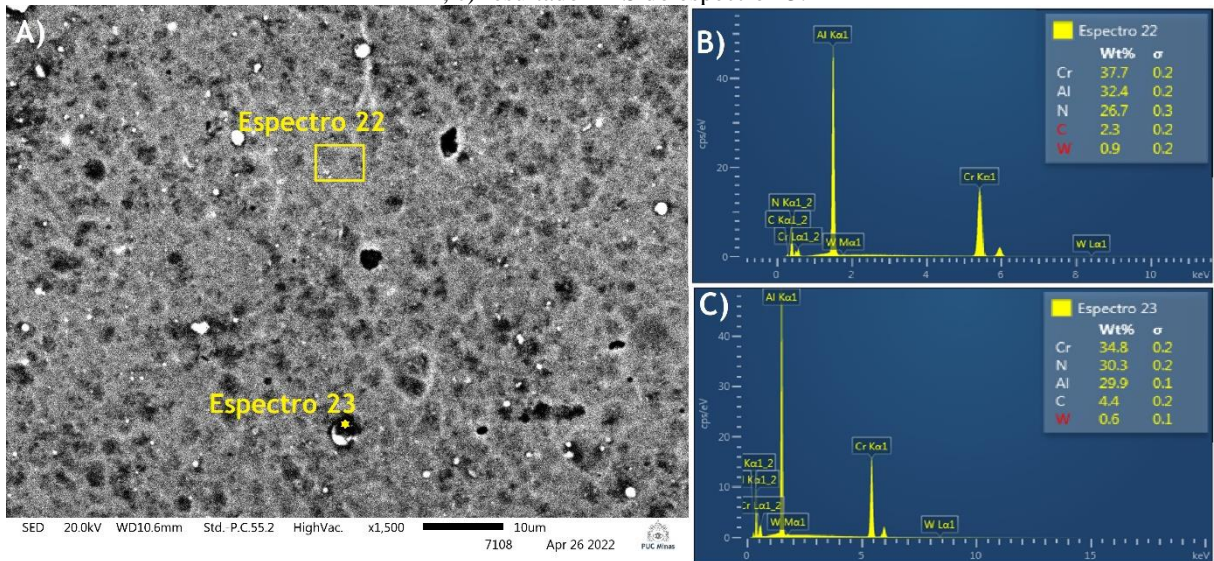
Figura 5.17 – Imagens da superfície da matriz via MEV: a) antes do ensaio; b) após o ensaio;



Fonte: a autora (2023)

A Figura 5.18 apresenta imagem via MEV e análise de EDS da matriz de WC-10Co revestida com AlCrN antes do ensaio de compressão. O revestimento apresenta pequenas gotas brancas dispersas no revestimento, essas gotas são um defeito típico do processo PVD onde são formadas pela reação entre o nitrogênio e os metais durante o processo de revestimento (AIHUA *et al.*, 2012; SOUZA *et al.*, 2020). Pelos espectros 22 e 23 (Figura 5.18b e c), os elementos químicos apresentados apontam a presença de cromo, alumínio e nitrogênio e valores residuais de carbono e tungstênio. O cromo, alumínio e nitrogênio são elementos presentes no revestimento de AlCrN. O carbono e o tungstênio aparecem em baixa concentração, podendo ser oriundos do substrato da matriz que é constituída de WC-10Co.

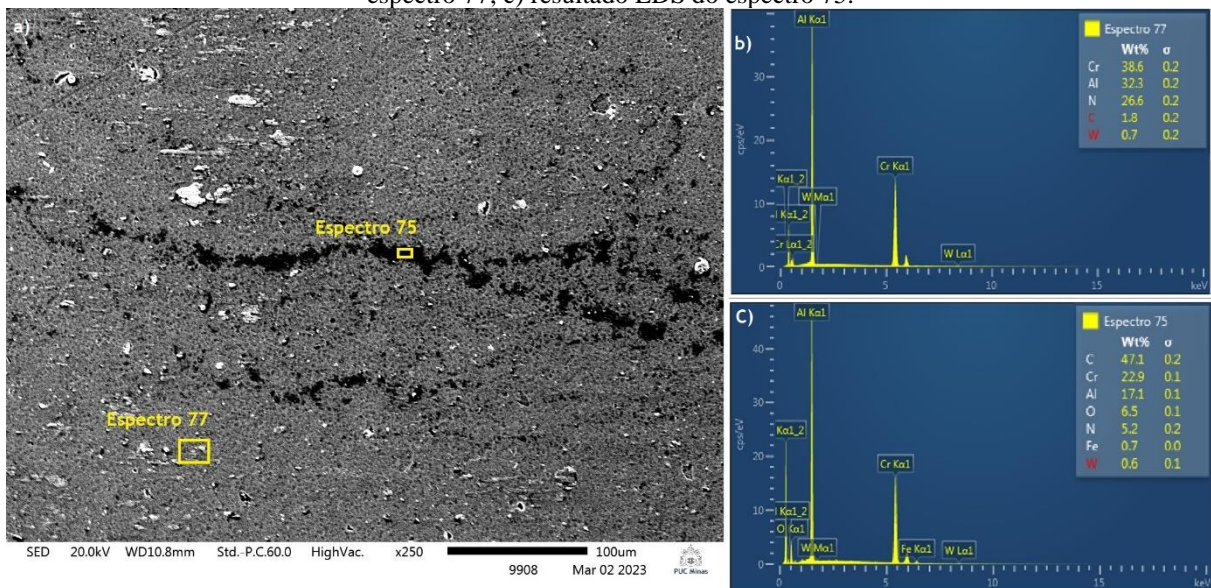
Figura 5.18 – Análise superficial da matriz antes do ensaio: a) imagem via MEV; b) resultado EDS do espectro 22; c) resultado EDS do espectro 23.



Fonte: a autora (2023)

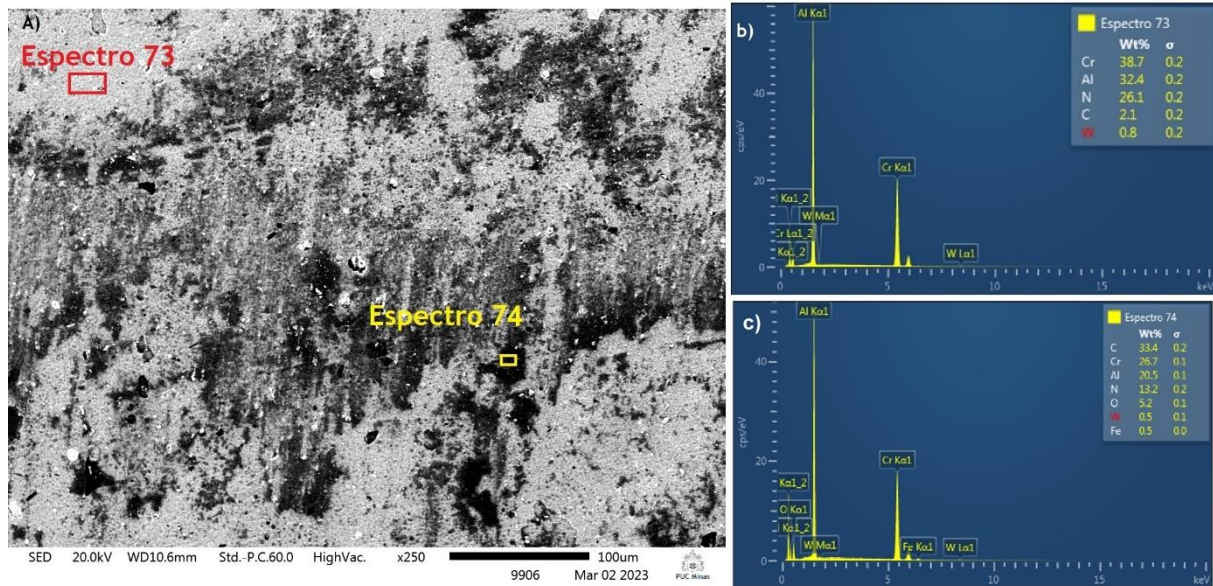
As Figuras 5.19 e 5.20 apresentam imagens via MEV e análise EDS das superfícies das matrizes comprimidas à 200 e a 400°C, respectivamente. Os espectros 77 (Figura 5.19b) e 73 (Figura 5.20b) abrangem uma região mais uniforme em ambas as amostras, os elementos encontrados pela análise são os mesmos encontrados anteriormente na matriz antes do ensaio, conforme Figura 5.18. Essas regiões não apontam mudanças na superfície. Os espectros 75 (Figura 5.19c) e 74 (Figura 5.20c) abrangem uma região escurecida, além dos elementos químicos apresentados nos espectros 77 e 73, apresentam também o oxigênio e o ferro. Moghaddam *et al.* (2021) apresentaram um estudo sobre o comportamento do pino de aço 316L e o disco de metal duro revestido com TiAlN após o ensaio de desgaste por deslizamento. Pela análise de MEV e EDS, observaram ferro e oxigênio na região de desgaste do disco de metal duro com revestimento de TiAlN para o ensaio realizado à 400°C. Segundo Moghaddam *et al.* (2021), a alta temperatura favoreceu a adesão dos óxidos formados pelo aço 316L na superfície revestida. Com isso, os vestígios de ferro e oxigênio observados nas Figuras 5.19 e 5.20 indicam uma adesão do material do anel de aço ABNT 1045.

Figura 5.19 – Análise superficial da matriz comprimida à 200°C: a) imagem via MEV; b) resultado EDS do espectro 77; c) resultado EDS do espectro 75.



Fonte: a autora (2023)

Figura 5.20 – Análise superficial da matriz comprimida à 200°C: a) imagem via MEV; b) resultado EDS do espectro 77; c) resultado EDS do espectro 75.

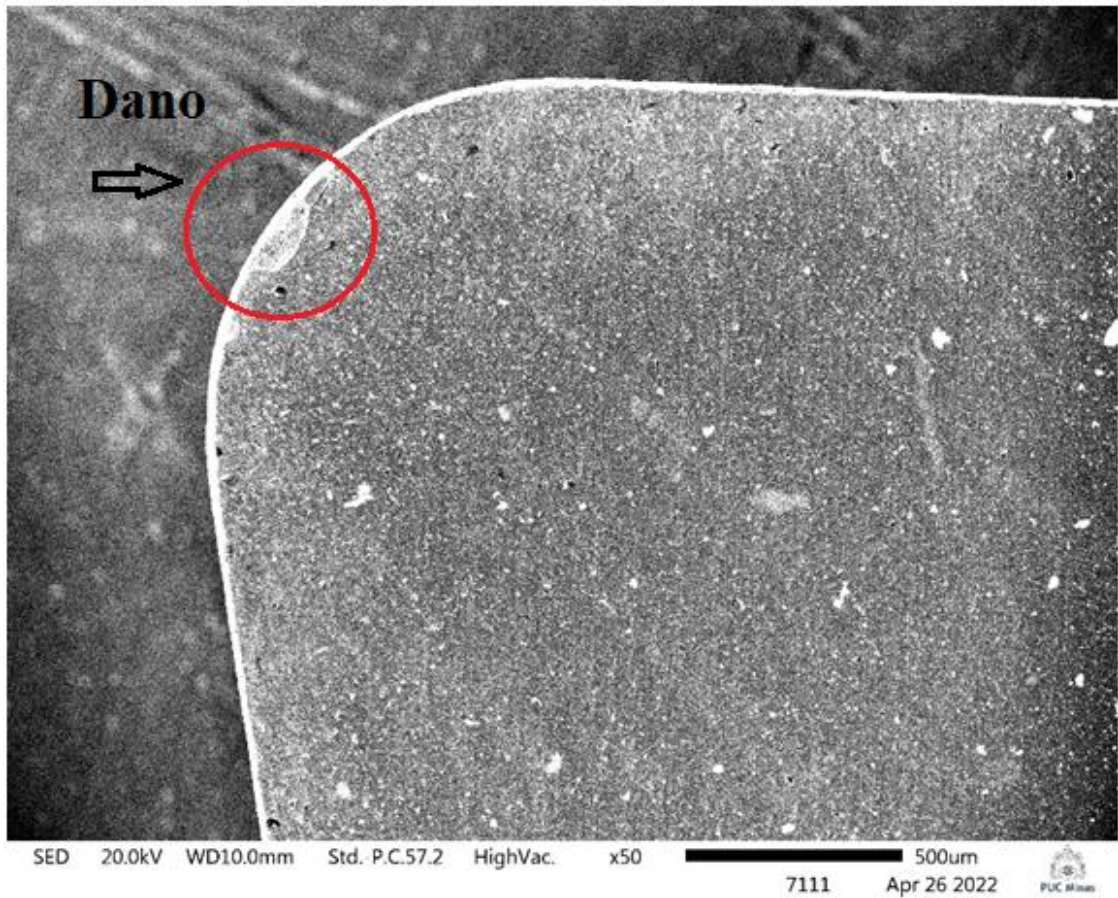


Fonte: a autora (2023)

#### 5.4.3 Inseto

Foi observada a superfície dos insertos antes do ensaio de torneamento por meio de imagens via MEV com amplificação de 50x. Pode-se notar por meio da Figura 5.21, pequenos danos na ponta da ferramenta. Com base na escala da Figura 5.21, o dano tem dimensões menores que 500  $\mu\text{m}$ . Durante a preparação do inserto, a retifica feita para retirar o quebra-cavaco do inserto pode ter arrancado uma pequena porção de material da ponta da ferramenta, ocasionando o dano.

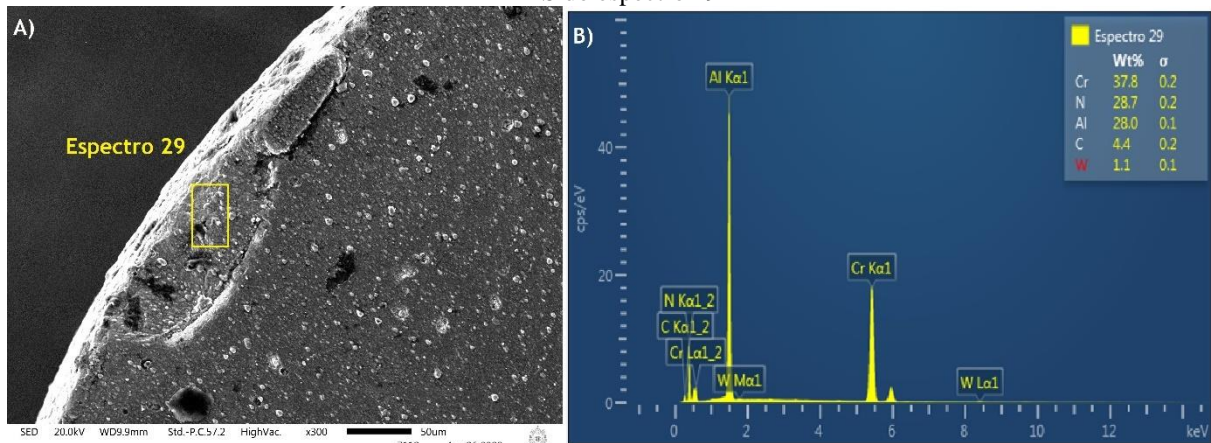
Figura 5.21 – Análise superficial do inserto antes do ensaio de torneamento.



Fonte: a autora (2023)

Por meio da análise de MEV e EDS, o dano observado na ponta da ferramenta possui todos os elementos do revestimento AlCrN e do substrato de WC-10Co, com exceção do cobalto possivelmente devido à baixa concentração. Com isso, o revestimento aplicado se aderiu à cratera, conforme pode ser observado na Figura 5.22.

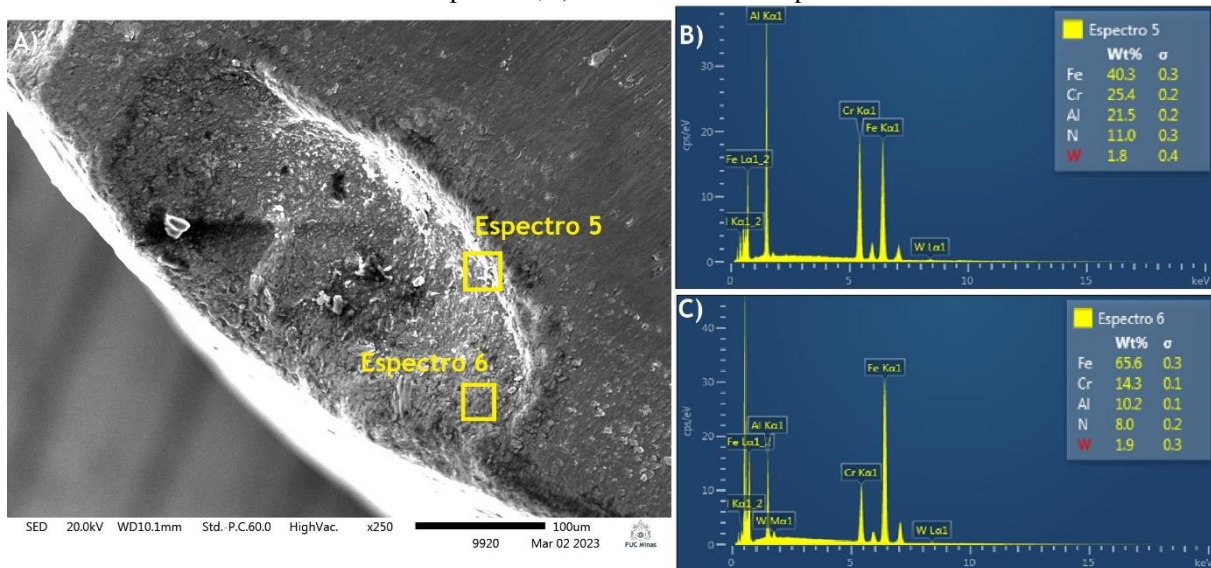
Figura 5.22 - Análise superficial do inserto antes do ensaio de torneamento: a) imagem via MEV; b) resultado EDS do espectro 29



Fonte: a autora (2023)

Após o ensaio de torneamento, foi observada a superfície de saída do inserto via MEV. Na Figura 5.23 é possível observar que na cratera os elementos químicos do revestimento de AlCrN, além de valores residuais de tungstênio, possivelmente provenientes do substrato de WC-10Co. Os espectros 5 (Figura 5.23b) e 6 (Figura 5.23c) apresentam alta concentração de ferro, que pode ter origem do material da peça (tarugo de aço ABNT 1045). Os elementos químicos do revestimento existem em grande concentração, o que sugere que não houve arrancamento nem desgaste do revestimento causado pelo ensaio de torneamento.

Figura 5.23 – Análise superficial do inserto após o ensaio de torneamento: a) imagem via MEV; b) resultado EDS do espectro 5; c) resultado EDS do espectro 6.



Fonte: a autora (2023)

## 5.5 Coeficiente de atrito

O coeficiente de atrito obtido por meio dos resultados do ensaio de torneamento e ensaio de compressão de anel é apresentado neste tópico.

### 5.5.1 Ensaio de torneamento

As componentes de forças de usinagem obtidas no ensaio de torneamento são apresentadas na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Tabela de força de usinagem do ensaio de torneamento

Velocidade de corte (m/min)	Teste	Força passiva (N)	Força de avanço (N)	Força de corte (N)
<b>150</b>	1	172,3 ± 18,2	202,9 ± 14,1	479,7 ± 43,2
	2	130,2 ± 11,2	179,5 ± 17,3	419,8 ± 39,5
	3	252,8 ± 29,3	344,3 ± 36,8	745,9 ± 57,2
	4	163,6 ± 15,6	250,1 ± 23,5	518,3 ± 42,7
	5	118,6 ± 17,8	179,2 ± 9,8	380,7 ± 31,9
	6	214,5 ± 20,3	350,8 ± 37,2	750,3 ± 59,1
<b>220</b>	1	198,2 ± 9,3	345,7 ± 17,6	543,4 ± 22,3
	2	218,6 ± 5,3	275,1 ± 18,2	480,7 ± 18,9
	3	192,5 ± 2,9	350,8 ± 11,0	605,9 ± 21,3
	4	229,6 ± 8,3	290,7 ± 15,3	545 ± 15,4
	5	210,9 ± 15,6	369,4 ± 22,8	601,6 ± 25,6
	6	180,1 ± 19,3	288,3 ± 23,6	514,6 ± 13,7

Fonte: a autora (2023)

Com os dados de forças obtidos, foi possível calcular o coeficiente de atrito conforme a Equação 2.3. Os resultados são apresentados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Coeficiente de atrito do ensaio de torneamento

Velocidade de corte (m/min)	Teste	Coeficiente de atrito ( $\mu$ )
150	1	0,579
	2	0,581
	3	0,622
	4	0,645
	5	0,631
	6	0,625
220	1	0,833
	2	0,764
	3	0,760
	4	0,714
	5	0,805
	6	0,740

Fonte: a autora (2023)

### 5.5.2 Compressão de anel

Após os ensaios de compressão dos anéis, foram medidos a espessura e os diâmetros interno e externo de cada anel. A média e o desvio-padrão dos resultados são apresentados na Tabela 5.12. Os resultados de diâmetro interno e externo foram apresentados em raios em conformidade com as Equações 2.5, 2.6 e 2.7. A Tabela 5.12 também apresenta o valor correspondente de  $R_n$  para cada amostra, determinado por meio da Equação 2.5.

Tabela 5.12 – Medidas dos anéis após a deformação

Temperatura (°C)	Amostra	$R_i$ (mm)	$R_o$ (mm)	T (mm)	$R_n$ (mm)
200	1	3,05 ± 0,10	11,05 ± 0,09	3,60 ± 0,08	5,22
	2	3,05 ± 0,07	11,06 ± 0,12	3,50 ± 0,05	5,22
	3	4,00 ± 0,07	9,95 ± 0,05	4,50 ± 0,10	5,52
	4	3,90 ± 0,11	10,05 ± 0,05	4,20 ± 0,10	5,55
	5	3,95 ± 0,09	10,15 ± 0,07	4,40 ± 0,8	5,41
	6	3,90 ± 0,05	9,95 ± 0,10	4,50 ± 0,05	5,55
400	7	3,75 ± 0,12	10,20 ± 0,07	4,30 ± 0,05	5,75
	8	3,65 ± 0,10	10,10 ± 0,05	4,20 ± 0,07	5,65
	9	3,70 ± 0,05	10,10 ± 0,05	4,30 ± 0,08	5,75
	10	3,70 ± 0,08	10,10 ± 0,10	4,20 ± 0,10	5,56
	11	3,80 ± 0,07	10,20 ± 0,5	4,40 ± 0,10	5,63
	12	3,70 ± 0,10	10,05 ± 0,7	4,40 ± 0,12	5,73

Fonte: a autora (2023)

O valor de  $R_n$  encontrado para cada amostra se enquadra na condição  $R_i \leq R_n \leq R_o$ . Com isso, a constante do fator de atrito ( $m$ ) foi calculada de acordo com a Equação 2.7. Assim foi possível obter o coeficiente de atrito por meio da Equação 2.8. O resultado do coeficiente de atrito é apresentado na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Resultado do coeficiente de atrito do ensaio de compressão de anel

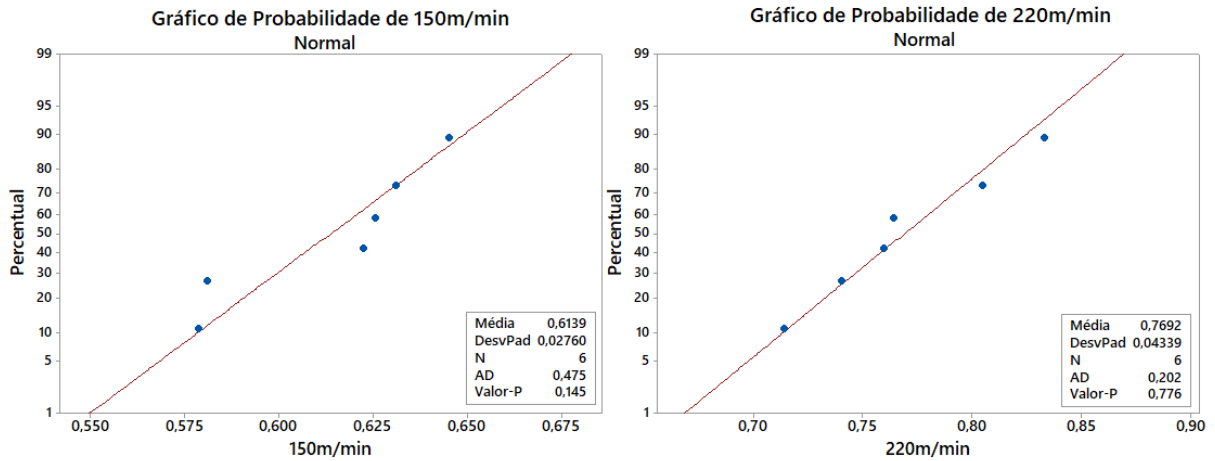
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Teste</b>	<b>Fator de atrito (<math>m</math>)</b>	<b>Coeficiente de atrito (<math>\mu</math>)</b>
200	1	1,043	0,602
	2	1,039	0,600
	3	1,086	0,627
	4	1,083	0,625
	5	0,980	0,566
	6	1,193	0,689
400	1	1,389	0,802
	2	1,338	0,802
	3	1,486	0,858
	4	1,242	0,717
	5	1,249	0,721
	6	1,520	0,878

Fonte: a autora (2023)

### 5.6.3 Análise estatística

Com os valores de coeficiente de atrito obtidos pelo ensaio de compressão de anel e pelo ensaio de usinagem, foi realizado o teste de Anderson-Darling a fim de determinar se os valores seguem uma distribuição normal. A Figura 5.24 apresenta os gráficos do teste de normalidade com os valores de coeficiente de atrito no ensaio de torneamento para cada velocidade de corte empregada no ensaio. Desta forma, o  $p$ -valor encontrado atestou que os valores seguem uma distribuição normal.

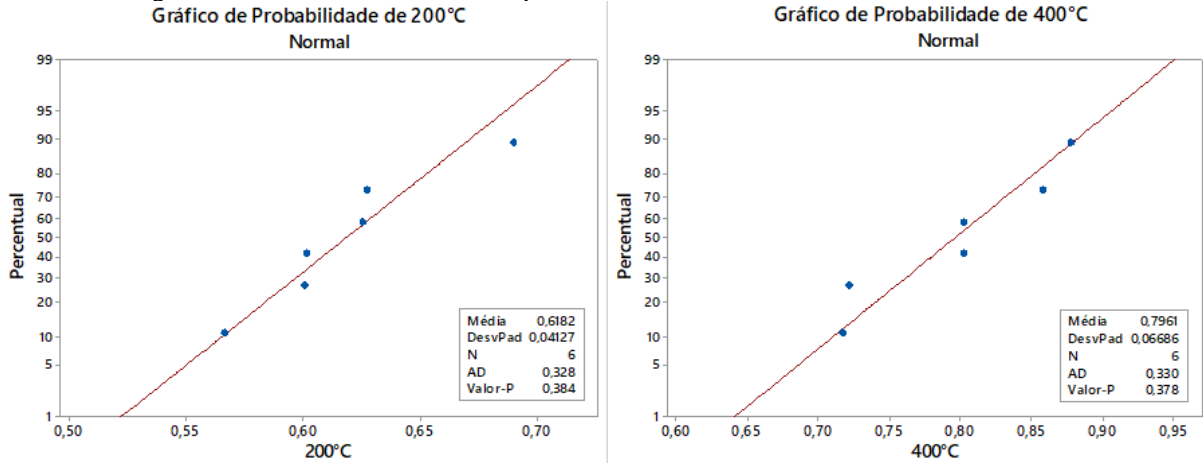
Figura 5.24 – Teste de normalidade para o coeficiente de atrito no ensaio de torneamento



Fonte: a autora (2023)

O teste de normalidade de Anderson-Darling também foi empregado para os resultados obtidos no ensaio de compressão de anel. Com isso, o *p-valor* obtido pelo teste mostra que os valores do coeficiente de atrito na compressão de anel também seguem uma distribuição normal, conforme Figura 5.25.

Figura 5.25 – Teste de normalidade para o coeficiente de atrito no ensaio de torneamento

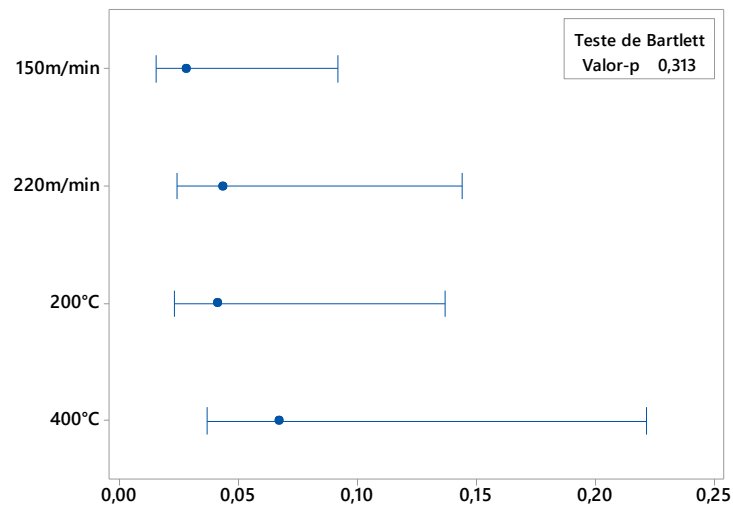


Fonte: a autora (2023)

Visto que os dados seguem uma distribuição normal, foi realizado a análise das variâncias por meio do teste de Bartlett, conforme a Figura 5.26.

Figura 5.26 – Teste de Levene para a igualdade de variâncias para os coeficientes de atrito dos ensaios de compressão e ensaios de torneamento

Teste de igualdade de variâncias: 150m/min; 220m/min; 200°C; 400°C



Fonte: a autora (2023)

Os resultados mostraram que todos os coeficientes de atrito apresentaram variâncias iguais, ou seja, os testes realizados obtiveram o mesmo grau de variabilidade. Com isso, foi possível aplicar o teste t para duas amostras a fim de atestar a igualdade entre os valores de coeficiente de atrito obtido pelo trabalho experimental. Com base no exposto por Montgomery e Runger (2016), primeiramente, delimitou-se a região de decisão do teste t. Com isso, observou-se que o grau de liberdade do teste é igual a 10 e o nível de significância adotado corresponde a 5%. Desta forma, a região de aceitação de  $H_0$  dentro da curva da distribuição  $t$  de Student é delimitada entre  $-2,23$  a  $2,23$ .

Primeiramente, verificou-se se há diferença significativa entre o coeficiente de atrito encontrado no ensaio de torneamento adotando a velocidade de corte de 150 e 220 m/min. A Tabela 5.14 apresenta o resultado do teste. Com isso nota-se que há evidências, ao nível de significância de 5%, para afirmar que as médias são diferentes. Portanto, pelo teste estatístico, a mudança na velocidade de corte alterou significativamente o coeficiente de atrito.

Tabela 5.14 – Teste t para as velocidades de corte no ensaio de torneamento

150 m/min	220 m/min	Valor-T	IC de 95%	Teste de Hipóteses
				$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$
0,614±0,028	0,769±0,043	7,40	(0,109; 0,202)	0,000

Fonte: a autora (2023)

Foi realizado o teste para as duas condições de ensaio usadas no ensaio de compressão de anel, a fim de verificar se a mudança de parâmetro influencia significativamente o coeficiente de atrito. Os resultados apresentados na Tabela 5.15 mostram que existem evidências significativas ( $p\text{-valor}=0,000$ ) para rejeitar a hipótese nula em favor da alternativa. Ou seja, ao nível de significância de 5%, a temperatura tem influência no coeficiente de atrito, fazendo com que o coeficiente de atrito seja diferente nas duas condições.

Tabela 5.15 – Teste t para as temperaturas de ensaio no ensaio de compressão

<b>200°C</b>	<b>400°C</b>	<b>valor-T</b>	<b>IC de 95%</b>	<b>Teste de Hipóteses</b> <b>H<sub>1</sub>: <math>\mu_1 - \mu_2 \neq 0</math></b>
0,618±0,041	0,796±0,067	-5,55	(-0,2494; -0,1065)	0,000

Fonte: a autora (2023)

Observou-se que os parâmetros aplicados nos ensaios de torneamento e compressão de anel influenciaram diretamente no coeficiente de atrito, resultando em um valor característico para cada ensaio. Com isso, foi realizado o teste para comparar o coeficiente de atrito obtido no ensaio de compressão à 200°C e no ensaio de torneamento com velocidade de corte de 150 m/min. Como apresentado na Tabela 5.16, não existe diferença significativa no coeficiente de atrito encontrado nos testes ( $p\text{-valor}=0,834$ ). Portanto, com estes parâmetros (150 m/min e 200°C) é possível estimar o coeficiente de atrito no torneamento pelo ensaio de compressão de anel.

Tabela 5.16 – Teste t para o ensaio de torneamento a 150 m/min e ensaio de compressão de anel à 200°C

<b>150 m/min</b>	<b>200°C</b>	<b>Valor-T</b>	<b>IC de 95%</b>	<b>Teste de Hipóteses</b> <b>H<sub>1</sub>: <math>\mu_1 - \mu_2 \neq 0</math></b>
0,614±0,028	0,618±0,041	0,21	(-0,0408; 0,0495)	0,834

Fonte: a autora (2023)

O teste foi realizado para verificar se o coeficiente de atrito obtido pelo ensaio de compressão de anel à 400°C é correspondente ao coeficiente de atrito encontrado no ensaio de torneamento com velocidade de corte à 150 m/min. Como visto na Tabela 5.17, as médias do coeficiente de atrito não são correspondentes ( $p\text{-valor}=0,000$ ) e não podem ser equiparadas.

Tabela 5.17 – Teste t para o ensaio de torneamento a 150 m/min e ensaio de compressão de anel à 400°C

<b>150 m/min</b>	<b>400°C</b>	<b>Valor-T</b>	<b>IC de 95%</b>	<b>Teste de Hipóteses</b> <b>H<sub>1</sub>: <math>\mu_1 - \mu_2 \neq 0</math></b>
0,614±0,028	0,796±0,067	6,17	(0,117; 0,248)	0,000

Fonte: a autora (2023)

Então, foi realizado o teste para o ensaio de compressão à 200°C e para o ensaio de torneamento com velocidade de corte igual a 220 m/min. Segundo o resultado apresentado na Tabela 5.18, existe uma diferença significativa entre as médias ( $p\text{-valor}=0,000$ ), assim não é possível afirmar que os coeficientes de atrito para estes parâmetros são correspondentes.

Tabela 5.18 – Teste t para o ensaio de torneamento a 220 m/min e ensaio de compressão de anel à 200°C

<b>220 m/min</b>	<b>200°C</b>	<b>Valor-T</b>	<b>IC de 95%</b>	<b>Teste de Hipóteses</b> <b>H<sub>1</sub>: <math>\mu_1 - \mu_2 \neq 0</math></b>
0,769±0,043	0,618±0,041	-6,18	(-0,205; -0,097)	0,000

Fonte: a autora (2023)

Por fim, foi realizado o teste t para o ensaio de torneamento com velocidade de corte à 220 m/min e ensaio de compressão de anel à 400°C. Com isso, conforme Tabela 5.19, verificou-se que não há evidências significativas para afirmar que as médias são diferentes ( $p\text{-valor}=0,427$ ). Portanto com estes parâmetros (220 m/min e 400°C), é possível estimar o coeficiente de atrito encontrado no ensaio de torneamento pelo ensaio de compressão de anel.

Tabela 5.19 – Teste t para o ensaio de torneamento a 220 m/min e ensaio de compressão de anel à 400°C

<b>220 m/min</b>	<b>400°C</b>	<b>valor-T</b>	<b>IC de 95%</b>	<b>Teste de Hipóteses</b> <b>H<sub>1</sub>: <math>\mu_1 - \mu_2 \neq 0</math></b>
0,769±0,043	0,796±0,067	0,83	(-0,046; 0,100)	0,427

Fonte: a autora (2023)

## 6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados encontrados nos testes de caracterização microestrutural, dureza, análise superficial bem como o ensaio de torneamento e ensaio de compressão de anel, é possível concluir que:

➤ Com a análise microestrutural, nota-se uma estrutura mista de ferrita e perlita, a qual é característica em aços com médio teor de carbono recozidos. Com a análise da dureza, observou-se por meio do ensaio de dureza e microdureza, que o ensaio de compressão de anel provocou o aumento da dureza do aço ABNT 1045 devido ao encruamento dos grãos, porém não houve alteração da dureza dos grãos de ferrita e perlita.

➤ Com a análise superficial, observou-se um aumento significativo da rugosidade dos anéis e da matriz depois do ensaio de compressão de anel. Pelos resultados de MEV e EDS, houve adesão do material do anel na superfície da matriz e adesão do material da matriz na superfície do anel e indícios de formação de óxidos, devido à presença de oxigênio. O dano presente nos insertos antes do ensaio de torneamento não trouxe alterações significativas o ensaio e o inserto não apresentou indícios de desgaste decorrentes ao ensaio.

➤ Por meio do ensaio de torneamento e do ensaio de compressão de anel, foram obtidos os respectivos coeficientes de atrito. Observou-se que estatisticamente não é possível afirmar que o coeficiente de atrito obtido por meio do ensaio de compressão de anel à 200°C e o coeficiente de atrito do ensaio de torneamento com velocidade de 150 m/min são diferentes entre si. Afirar que são diferentes indica um erro de 83,4% (*p*-valor 0,834). Dessa forma, os coeficientes de atrito podem ser considerados iguais.

➤ Observou-se que estatisticamente não é possível afirmar que o coeficiente de atrito do ensaio de compressão de anel à 400°C e o coeficiente de atrito do ensaio de torneamento com velocidade de 220 m/min são diferentes entre si. Afirar que são diferentes indica um erro de 42,7% (*p*-valor 0,427). Assim, os coeficientes de atrito podem ser considerados iguais.

➤ Desta forma, com os parâmetros usados, foi possível simular o coeficiente de atrito no ensaio de torneamento por meio do ensaio de compressão de anel. Sendo assim, os resultados de compatibilidade dependem da relação dos parâmetros de corte do ensaio de torneamento e da temperatura do ensaio de compressão de anel.

## REFERÊNCIAS

- AIHUA, L.; JIANXIN, D.; HAIBING, C.; YANGYANG, C.; JUN, Z. Friction and wear properties of TiN, TiAlN, AlTiN and CrAlN PVD nitride coatings. **The International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, p.82–88, 2012.
- ALBRECHT, P. New developments in the theory of the metal-cutting process: part I. **Journal of Engineering for Industry**, v. 82, p. 348–357, 1960.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A311/A311M**. Standard Specification for cold-Drawn, Stress-Relieved Carbon Steel Bars Subject to Mechanical Property Requirements. 2015.
- AMERICAN SOCIETY OF METAL. **ASM: Heat Treater's Guide - Practices and Procedures for Irons and Steels**, 1995.
- ANTONOV, M.; AFSHARI, H.; BARONINS, J.; ADOBERG, E.; RAADIK, T.; HUSSAINOVA, I. The effect of temperature and sliding speed on friction and wear of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and ZrO<sub>2</sub> balls tested against AlCrN PVD coating. **Tribology International**, v.118, p. 500–514, 2018.
- AVITZUR, B. Forging of Hollow Discs. **Israel Journal of Technology**, v.2(3), p.295–304, 1964.
- AVITZUR, B.; KOHSER, R. A. Disk and Strip Forging for the Determination of Friction and Flow Strength Values. **ASLE Transactions**, v.21(2), p.143–151, 1978.
- AY, H.; YANG, W.J. Heat transfer and life of metal cutting tools in turning. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.41, p. 613–623, 1998.
- BAO, J.; BAI, J.; LV, S.; SHAN, D.; GUO, B.; XU, J. Interactive effects of specimen size and current density on tribological behavior of electrically-assisted micro-forming in TC4 titanium alloy. **Tribology International**, v.151, 2020.
- BOBZIN, K.; BAGCIVAN, N.; EWERING, M.; BRUGNARA, R. H.; THEIß, S. DC-MSIP/HPPMS (Cr,Al,V)N and (Cr,Al,W)N thin films for high-temperature friction reduction. **Surface and Coatings Technology**, v. 205, p. 2887–2892, 2011.
- BOESCH, P. R. J.; MARTINS, V.; SHAEFFER, L. Determinação do coeficiente de atrito pelo ensaio e compressão do anel: uma revisão. **Revista Thema**, v.8, p.1-11, 2011.
- CAKIR, E.; OZLU, E.; BAKKAL, M.; BUDAK, E. Investigation of temperature distribution in orthogonal cutting through dual-zone contact model on the rake face. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.96, p.81–89, 2018.
- CALAMAZ, M.; COUPARD, D.; GIROT, F. A new material model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti-6Al-4V. **Int. J. Mach. Tools Manuf.** 48 275–88, 2008.

- CHAN, W. L.; FU, M. W.; LU, J. The size effect on micro deformation behaviour in micro-scale plastic deformation. **Materials & Design**, v. 32(1), p. 198–206, 2011.
- CHEN, F. Y.; WANG, D. Z.; WU, S. J. Influence of ultrasonic vibration-assisted cutting on ploughing effect in cutting Ti6Al4V. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, p.21-42, 2021.
- CRISTINO, V. A. M.; ROSA, P. A. R.; MARTINS, P. A. F. Revisiting the Calibration of Friction in Metal Cutting. **Tribology Transactions**, v.55(5), p.652–664, 2012.
- DePIERRE, V.; GURNEY, F.; MALE, A. T. Mathematical calibration of the ring test with buldge formation. **Technical Report AFML-TR-72-37**, 1972.
- DESALEGN, W.; DAVIDSON, M. J.; KHANRA, A. K. Friction Factor Evaluation Using Experimental and Finite Element Methods for Al-4%Cu Preforms. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 23(8), p. 3058–3068, 2014.
- DUTTON, R.; SEETHARAMAN, V.; GOETZ, R.; SEMIATIN, S. Effect of flow softening on ring test calibration curves. **Materials Science and Engineering: A**, v.270(2), p.249–253, 1999.
- ENGEL, U. Tribology in microforming. **Wear**, v.260(3), p.265–273, 2006.
- FENG, Y.; ZHANG, L.; KE, R.; WAN, Q.; WANG, Z.; LU, Z. Thermal stability and oxidation behavior of AlTiN, AlCrN and AlCrSiWN coatings. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v.43, p.241–249, 2014.
- FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Edgard Blucher, 1970.
- FILICE, L.; MICARI, F.; RIZZUTI, S.; UMBRELLO, D. A critical analysis on the friction modelling in orthogonal machining. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, p.709–714, 2007.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. 2ed, Rio de Janeiro, LTC, 2012.
- GARCIA, R. L.; AMARAL, R. A.; ZABADAL, J.; PIBERNAT, C. C.; JUCHEM, F.; SCHMITZ, A. Resfriamento de um cilindro de aço: estudo experimental da convecção e radiação do calor. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.39(4), 2017.
- GOETZ, R. L.; JAIN, V. K.; MORGAN, J. T.; WIERSCHKE, M. W. Effects of Material and Processing Conditions upon Ring Calibration Curves. **Wear**, v.143(1), p.71–86, 1991.
- GRZESIK, W. **Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling e Applications**. 2 ed, Elsevier, 2017.
- GRZESIK, W.; RECH, J.; ZAK, K. Determination of friction in metal cutting with tool wear and flank face effects. **Wear**, v. 317, n. 1–2, p. 8–16, 2014.
- HAN, S.; MELKOTE, S. N.; HALUSKA, M. S.; WATKINS, T. R. White layer formation due to phase transformation in orthogonal machining of AISI 1045 annealed steel. **Materials science and Engineering: A**, v.488(1-2), p.195–204, 2008.

HAO, M. H.; XU, D. C.; WEI, F. Q.; LI, Q. Q. Quantitative analysis of frictional behavior of cupronickel B10 at the tool-chip interface during dry cutting. **Tribology International**, v. 118, p.163–169, 2018.

HAWKYARD, J. B.; JOHNSON, W. An analysis of the changes in geometry of a short hollow cylinder during axial compression. **International Journal of Mechanical Sciences**, v.9(4), p.163–182, 1967.

HE, G. H; LIU, X. L.; YAN, F. G. Research on the dynamic mechanical characteristics and turning tool life under the conditions of excessively heavy-duty turning. **Frontiers in Mechanical Engineering**, v.7, p.329–334, 2012.

HUTCHING, I; SHIPWAY, P. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. 2 ed., Elsevier., 2017.

INGRACI, R. R.; SCALON, V. L.; FIOCCHI, A. A.; SANCHEZ, L. E. A. Indirect cooling of the cutting tool with a pumped two-phase system in turning of AISI 1045 steel. **International Advanced Manufacturing Technology**, 2016.

JAWAHIR, I. S.; BRINKSMEIERS, E.; M'SAOUBI, R; ASPINWALL, D. K.; OUTEIRO, J. C.; MEYER, D.; UMBRELLO, D.; JAYAL, A. D. Surface integrity in material removal processes: recent advances. **CIRP Annals**, v.60, p. 603–26, 2011.

JEROLD, D. B.; P. M. Experimental investigation of turning AISI 1045 steel using cryogenic carbon dioxide as the cutting fluid. **Journal of Manufacturing Processes**, v.13(2), p.113–119, 2011.

JEROLD, D. B.; KUMAR, P. M. Experimental comparison of carbon-dioxide and liquid nitrogen cryogenic coolants in turning of AISI 1045 steel. **Cryogenics**, v.52(10), p.569–574, 2012.

KALSS, W.; REITER, A.; DERFLINGER, V.; GEY, C.; ENDRINO, J. L. Modern coatings in high performance cutting applications. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v.24(5), p.399–404, 2006.

KAWATE, M.; KIMURA, A.; SUZUKI, T. Microhardness and lattice parameter of Cr<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N films. **Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films**, v.20(2), p.569–571, 2002.

KLOCKE, F.; DÖBBELER, B.; PENG, B.; SCHNEIDER, S. Tool-based inverse determination of material model of direct aged alloy 718 for FEM cutting simulation. **Procedia CIRP**, v.77, p. 54–57, 2018.

KRAUSS, G. **Steels: Processing, Structure and Performance**. ASM, 2ed., 2015.

KUMAR, C. S.; ZEMAN, P.; POLCAR, T. A 2D finite element approach for predicting the machining performance of nanolayered TiAlCrN coating on WC-Co cutting tool during dry turning of AISI 1045 steel. **Ceramics International**, 2020.

LEE, C. H.; ALTAN, T. Influence of Flow Stress and Friction Upon Metal Flow in Upset Forging of Rings and Cylinders. **ASME Journal Of Engineering For Industry**, v. 94, p. 775–782, 1972.

- LIANG, X. L.; LIU, Z. Q.; CHEN, L. X.; HAO, G. C.; WANG, B.; CAI, Y. K.; SONG, Q. H. Tool wear induced modifications of plastic flow and deformed material depth in new generated surfaces during turning Ti-6Al-4V. **Journal of Materials Research and Technology**, v.9, p.10782–10795, 2020.
- LIANG, X. L.; LIU, Z. Q.; WANG, B. State-of-the-art of surface integrity induced by tool wear effects in machining process of titanium and nickel alloys: a review. **Measurement**, v.132, 150–181, 2019.
- LIANG, X. L.; LIU, Z. Q.; WANG, B.; HOU, X. Modeling of plastic deformation induced by thermo-mechanical stresses considering tool flank wear in high-speed machining Ti-6Al-4V. **International Journal of Mechanical Sciences**, v.140, p.1–12, 2018.
- LIANG, X.; LIU, Z.; WANG, B.; WANG, C.; CHEUNG, C. Friction behaviors in the metal cutting process: state of the art and future perspectives. **International Journal of Extreme Manufacturing**, p.1-38, 2022.
- LING, C.; YAJID, M.; TAMIN, M.; KAMARUDIN, M.; TAIB, M.; NOSBI, N.; ALI, W. Effect of substrate roughness and PVD deposition temperatures on hardness and wear performance of AlCrN-coated WC-Co. **Surface & Coatings Technology**, v.128304, p.1-9, 2022.
- LUKASZKOWICZ, K.; SONDOR, J.; PARADECKA, A.; PAWLYTA, M.; CHMIELA, B.; PANCIELEJKO, M.; TAŃSKI, T. Structure and Tribological Properties of AlCrN + CrCN Coating. **Coatings**, v.10(11), p.1084, 2020.
- MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. Blucher, 2009.
- MAEKAWA, K.; KITAGAWA, T.; CHILDS, T. H. C. Friction characteristics at tool-chip interface in steel machining. **Tribology Series**, v. 32, p.559–567, 1997.
- MAHATO, A.; YEUNG, H.; GUO, Y.; VISWANATHAN, K.; SUNDARAM, N. K.; UDUPA, A.; MANN, J. B.; CHANDRASEKAR, S. Sinuous flow and folding in metals: implications for delamination wear and surface phenomena in sliding and cutting. **Wear**, v.376–377, p.1534–1541, 2017.
- MALE, A. T.; DePIERRE, V. The Validity of Mathematical Solutions for Determining Friction From the Ring Compression Test. **Journal of Lubrication Technology**, v.92(3), n.389, 1970.
- MARTINS, N. **Métodos analítico, numérico e prático aplicados na trefilação do cobre com variação do lubrificante**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerias, Belo Horizonte, 2018.
- MARTINS, V.; SHAEFFER, L. Comparação entre lubrificantes pela verificação do atrito em alumínio e aço. **Corte & Conformação de Metais**, 2009.
- MARUDA, R. W.; KROLCZYK, G. M.; MICHALSKI, M.; NIESLONY, P.; WOJCIECHOWSKI, S. Structural and Microhardness Changes After Turning of the AISI 1045 Steel for Minimum Quantity Cooling Lubrication. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v.26(1), p.431–438, 2016.

MATSUMOTO, R.; AKIYAMA, Y.; DEGUCHI, H.; UTSUNOMIYA, H. Influence of uneven interface between steel and oxide scale on deformation behavior of oxide scale in hot ring compression. **Procedia Manufacturing**, v.15, p.349–355, 2018.

MERCHANT, M. E. Mechanics of the metal cutting process. II. Plasticity conditions in orthogonal cutting. **Journal of Applied Physics**. v.16, p.318–24, 1945.

MO, J. L.; ZHU, M. H.; LEYLAND, A.; & MATTHEWS, A. Impact wear and abrasion resistance of CrN, AlCrN and AlTiN PVD coatings. **Surface and Coatings Technology**, v.215, p.170–177, 2013.

MOGHADDAM, P. V.; PRAKASH, B.; VUORINEN, E.; FALLQVIST, M.; ANDERSSON, J. M.; HARDELL, J. High temperature tribology of TiAlN PVD coating sliding against 316L stainless steel and carbide-free bainitic steel. **Tribology International**, v.159, 2021.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada E Probabilidade Para Engenheiros**. LTC, 6 ed., 2016.

MOUFKI, A.; MOLINARI, A. A new thermomechanical model of cutting applied to turning operations. Part II. Parametric study. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v.45, p.181–93, 2005.

NOH, J. H.; MIN, K.H.; HWANG, B. B. Deformation characteristics at contact interface in ring compression. **Tribology International**, v.44(9), p.947–955, 2011.

NOROZIFARD, V.; HAMEDI, M. A three-dimensional heat conduction inverse procedure to investigate tool–chip thermal interaction in machining process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.74(9-12), p.1637–1648, 2014.

PENG, B. X.; BERGS, T.; SCHRAKNEPPER, D.; SMIGIELSKI, T.; KLOCKE, F. Development and validation of a new friction model for cutting processes. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.107, p.4357–4369, 2020.

PENG, L.; LAI, X.; LEE, H.J.; SONG, J.H.; NI, J. Friction behavior modeling and analysis in micro/meso scale metal forming process. **Materials & Design**, v.31(4), p.1953–1961, 2010.

RABINOWICZ, E. **Friction and wear of materials**. 2 ed., 1995.

RAO, K. P.; SIVARAM, K. A review of ring-compression testing and applicability of the calibration curves. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 37, p.295–318, 1993.

REIS, B. C. M. **Influência da adição de nióbio sobre a usinabilidade de ferro fundido cinzento perlítico na operação de torneamento**. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, 2021.

RODRIGUES, H. L. **Relação desgaste-acabamento superficial em ferramentas de metal dura com revestimento triplo no torneamento de aços**. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, 2005.

SHIRAKASHI, T.; USUI, E. Friction characteristics on tool face in metal machining. **Journal Japan Society for Precision Engineering**, v.39, p.966–972, 1973.

SHNEIDER, E. L.; PFINGSTAG, M. E.; BUENO, A. F.; MARTINS, V.; RODRIGUES, W. C.; SHAEFFER, L. **Determinação de coeficientes de atrito através de testes de compressão de anéis, de aços para construção mecânica.** CONEM, 2010.

SILVA, E. V.; CRUZ, L. W. M.; MARTINS, N.; VIEIRA, A. L.; JÚNIOR, P. A. A. M.; SILVA, G. C. **Correlação de coeficientes de atrito pelo teste do anel e gerados através do software Abaqus.** CILAMCE, 2017.

SOARES, E. **Coeficiente de atrito no ensaio do anel: estudo do efeito da velocidade de deformação, grau de deformação e aderência de material à superfície da ferramenta.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SONG, W.; WANG, Z.; DENG, J.; ZHOU, K.; WANG, S.; GUO, Z. Cutting temperature analysis and experiment of Ti–MoS<sub>2</sub>/Zr-coated cemented carbide tool. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.93(1-4), p.799–809, 2017.

SOUZA, P. S.; SANTOS, A. J.; COTRIM, M. A. P.; ABRÃO, A. M.; CÂMARA, M. A. Analysis of the surface energy interactions in the tribological behavior of ALCrN and TiAlN coatings. **Tribology International**, v.106206, 2020.

SRIVASTAVA, A.; SHRIVASTAVA, A.; MISHRA, A. B. Analysis of Friction Factor & Coefficient Of Friction Using Ring Compression Test under Various Lubricants. **International Journal of Engineering and Technical Research**, v.9, n.6, p. 17-23, 2019.

TRENT, E.; WRIGHT, P. **Metal Cutting**, 4 ed, 2000.

VANDANA, A. S.; SUNDARAM, N. K. Simulation of sinuous flow in metal cutting. **Tribology Letters**, v.66, p.94, 2018.

WOLLA, D. W.; DAVIDSON, M. J.; KHANRA, A. K. Evaluation of Friction of Powder Metallurgical Al–4 wt% Cu Preforms by Employing Ring Compression Test and FEM in Hot Compression Test. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, v.69(5), p.1031–1041, 2016.

ZCC. **Cemented Carbide: Rods e Bars.** 2018. Disponível em: <http://zccamerica.com/wp-content/uploads/2018/02/ZCC-carbide-rods-2018.pdf>. Acesso em: 24 de fev. 2023.

ZHANG, C.; LU, J.; ZHANG, F.; BUTT, S. I. Identification of a new friction model at tool-chip interface in dry orthogonal cutting. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.89(1-4), p.921–932, 2016.

ZHANG, D.; YANG, G.; ZHAO, S. Frictional behavior during cold ring compression process of aluminum alloy 5052. **Chinese Journal of Aeronautics**, 2020.

ZOREV, N. N. Inter-relationship between shear processes occurring along tool face and shear plane in metal cutting. **Proceedings of the International Research in Production Engineering Conference**, p. 42–49, 1963.