



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

JONATA WILLIAN DA CONCEIÇÃO

Caracterização mecânica da liga de alumínio AA7075-T6 com alteração superficial: anodização dura, níquel duro químico e nitretação a plasma

Joinville

2026

JONATA WILLLIAN DA CONCEIÇÃO

Caracterização mecânica da liga de alumínio AA7075-T6 com alteração superficial: anodização dura, níquel duro químico e nitretação a plasma

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Roberto Simoni, Dr.
Coorientador: Prof. Adriano Fagali de Souza, Dr.

Joinville

2026

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Conceição, Jonata Willian da

Caracterização mecânica da liga de alumínio AA7075-T6 com alteração superficial: anodização dura, níquel duro químico e nitretação a plasma / Jonata Willian da Conceição ; orientador, Roberto Simoni, coorientador, Adriano Fagali de Souza, 2026.

99 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2026.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. Molde em liga de alumínio. 3. liga de alumínio 7075-T6. 4. revestimento superficial. I. Simoni, Roberto. II. Souza, Adriano Fagali de. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas. IV. Título.

Jonata Willian da Conceição

Caracterização mecânica da liga de alumínio AA7075-T6 com alteração superficial: anodização dura, níquel duro químico e nitretação a plasma

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado, em 05/12/2025, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Roberto Simoni, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Adriano Fagali de Souza, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Alexandre Mikowski, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Júlio César Giubilei Milan, Dr.

Universidade do Estado de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia em Ciências Mecânicas.

Coordenador do Programa de Pós- Graduação

Prof. Roberto Simoni, Dr.

Orientador

Joinville, 2026

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre me guiar pelos caminhos da vida. Agradeço aos meus familiares, pai, mãe (em memória), irmãos, tias e principalmente a minha esposa Ana Claudia, pela paciência e incentivo durante todo o desenvolvimento desse trabalho. Aos professores, Dr. Roberto Simoni e Dr. Adriano Fagali, não só pela orientação, mas por terem acreditado e me proporcionado a oportunidade de aprender com o ensinamento compartilhado. Aos professores Dr. Júlio Cesar Milan e Dra. Marilena Valadares Folgueras da UDESC/CCT por disponibilizar o tribômetro, o perfilômetro e o microscópio eletrônico. Ao Instituto Federal Catarinense – Campus Luzerna pelo auxílio para preparação das amostras, realização dos ensaios de metalografia, dureza e no processo de nitretação a plasma.

À Universidade Federal de Santa Catarina, pela oportunidade de desenvolver este trabalho. Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas que, com muita competência e dedicação me proveram de conhecimentos.

Aos apoiadores do projeto, as universidades IFC - Campus Luzerna, UDESC/CCT e UFSC. Enfim, a todos que em algum instante da minha trajetória compartilharam comigo de momentos de sabedoria, o meu sincero muito obrigado.

“O êxito da vida não se mede pelo caminho que você conquistou, mas sim pelas dificuldades que superou no caminho”

(Abraham Lincoln)

RESUMO

A constante busca por aperfeiçoamento e sustentabilidade dos processos produtivos, é uma necessidade latente no processo de injeção de peças termoplásticas. Embora existam inúmeras vantagens, a utilização de alumínio como matéria prima para fabricação de moldes ainda é pouco difundida, estando restrita, em sua maioria, à fabricação de protótipos ou pequenos lotes de peças. Já em países desenvolvidos, montadoras e outros setores, utilizam moldes em alumínio para injeção de resinas termoplásticas há anos, com excelentes resultados. Os principais fatores que limitam a utilização do alumínio como matéria-prima para fabricação de moldes estão relacionados à menor resistência mecânica, em relação aos aços comumente utilizados e o desconhecimento dos benefícios da alta condutividade térmica para obtenção de um processo produtivo com alta produtividade e qualidade.

Analisando o processo produtivo desde o projeto do molde para injeção de peças termoplásticas, buscou-se estudar a viabilidade da otimização da matéria-prima comumente utilizada para a fabricação de moldes para injeção, através do emprego da liga de alumínio 7075-T6 com tratamento superficial.

Assim, para fins comparativos foram realizados tratamentos superficiais de nitretação a plasma, anodização dura e revestimento com níquel duro químico, em liga de alumínio 7075-T6, visando o aprimoramento das propriedades mecânica e tribológicas na liga de alumínio estudada. Foram avaliados aspectos técnicos para fabricação de moldes, através dos ensaios de dureza Vickers, rugosidade, condutividade térmica e pino sobre disco para mensurar a variação das propriedades tribológicas.

Palavras-chave: Molde em liga de alumínio, liga de alumínio 7075-T6, anodização dura, revestimento de níquel duro químico e nitretação a plasma.

ABSTRACT

The constant search for improvement and sustainability of production processes is a latent need in the injection process of thermoplastic parts. Although there are numerous advantages, the use of aluminum as a raw material for manufacturing molds is still not very widespread, being mostly restricted to the manufacture of prototypes or small batches of parts. In developed countries, car manufacturers and other sectors have been using aluminum molds for the injection of thermoplastic resins for years, with excellent results. The main factors that limit the use of aluminum as a raw material for manufacturing molds are related to its lower mechanical resistance, in relation to commonly used steels, and the lack of knowledge of the benefits of high thermal conductivity for obtaining a production process with high productivity and quality. By analyzing the production process from the design of the mold for injection of thermoplastic parts, we sought to study the feasibility of optimizing the raw material commonly used for the manufacture of injection molds, through the use of 7075-T6 aluminum alloy with surface treatment. For comparative purposes, surface treatments of plasma nitriding, hard anodizing and chemical nickel plating were performed on 7075-T6 aluminum alloy, aiming at improving the mechanical and tribological properties of the aluminum alloy studied. Technical aspects for mold manufacturing were evaluated through Vickers hardness, roughness, thermal conductivity and pin-on-disc tests to measure the variation of tribological properties.

Keywords: Aluminum alloy mold, 7075-T6 aluminum alloy, hard anodizing, electroless nickel plating and plasma nitriding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Configuração básica do molde de injeção	22
Figura 2 - Transferência de Calor em um Molde	24
Figura 3 - Mecanismo de refrigeração adequado (a) e inadequado (b).	25
Figura 4 - Layout do sistema de resfriamento: (a) molde de aço P20 e (b) molde alumínio.....	27
Figura 5 - Distribuição de temperatura no molde de aço.....	28
Figura 6 - Distribuição de temperatura no molde de alumínio	28
Figura 7 - Diagrama orientativo na escolha do aço para fabricação de cavidades em moldes.....	30
Figura 8 - Projetos de molde, a) molde fabricado em P20 e b) molde fabricado em liga de alumínio 7075-T6.....	33
Figura 9 - Desenho esquemático do tratamento térmico T6 para liga de alumínio 7075.....	37
Figura 10 - Processo de nitretação a plasma	39
Figura 11 - Ilustra os dois tipos de óxidos obtidos no processo de anodização do alumínio: tipo barreira (a) e tipo poroso (b)	40
Figura 12 - Ilustração esquemática do processo de anodização industrial	41
Figura 13 - Processo para revestimento de níquel duro químico	42
Figura 14 - Desgaste abrasivo de dois corpos	44
Figura 15 - Fluxograma demonstrando a sequência de atividades desenvolvidas durante o presente trabalho	46
Figura 16 - Amostras dispostas para nitretação (a), câmara e equipamentos utilizados para nitretação (b), amostras em nitretação (c) e amostras após o processo de nitretação (d).....	49
Figura 17 - Monitoramento da condutividade térmica das amostras (a), Registrador de dados (b) e imagem de câmera térmica (c).....	56
Figura 18 - Equipamento utilizado no ensaio (a) e Impressão na amostra da pista de desgaste após realização do ensaio (b)	57
Figura 19 - Ilustração adaptada do ensaio de pino disco baseado na norma ASTM G99.....	58
Figura 20 - Perfilometro de coluna modelo CV-2100	58
Figura 21 - Perfilômetro óptico 3D.....	59

Figura 22 - Amostras produzidas para o estudo.....	61
Figura 23 - Ilustração do método de corte das amostras para análise (a) e amostras embutidas em baquelite para realização de ensaios (b).....	62
Figura 24 - Imagem de microscopia óptica da liga 7075-T6 com aumento de 400X.	62
Figura 25 - Imagens da superfície nitretada através de MEV.....	63
Figura 26 - Elementos na superfície da amostra nitretada (a) e amostra analisada.....	64
Figura 27 - Espectro de EDS da superfície com tratamento de nitretação a plasma	65
Figura 28 - Mapa de distribuição dos elementos químicos (EDS/MEV).....	66
Figura 29 - Imagem de superfície anodizada obtida com aumento de 200X (a) Imagem de superfície revestida de níquel duro, ampliação de 200X (b).	67
Figura 30 - Ensaio de dureza da seção transversal das amostras.....	68
Figura 31 - Resultados ensaios de condução térmica ao longo do tempo	71
Figura 32 - Amostras submetidas ao ensaio de pino disco (a) revestida de níquel, (b) Anodização dura, (c) nitretação a plasma e (d) 7075-T6	71
Figura 33 - Imagens ampliadas das pistas de rolagem	72
Figura 34 - Volume de material removido	74
Figura 35 - Imagens da topografia da trilha de desgaste 3D (a), 2D (b) e curva de perfil topográfico de amostra revestida com níquel duro(c).....	75
Figura 36 - Imagens da topografia da trilha de desgaste 3D (a), 2D (b) e curva de perfil topográfico de amostra submetida ao processo de anodização dura (c).....	76
Figura 37 - Imagens da topografia da trilha de desgaste 3D (a), 2D (b) e curva de perfil topográfico de amostra submetida ao processo de nitretação a plasma (c).....	77
Figura 38 - Imagens da topografia da trilha de desgaste 3D (a), 2D (b) e curva de perfil topográfico da liga de alumínio 7075-T6 (c)	78
Figura 39 - Amostras polidas.....	91
Figura 40 - Amostras preparadas para nitretação (a) e Amostras em processo de nitretação a plasma (b).....	91
Figura 41 – Amostra de 7075-T6 nitretada a plasma com bolhas nas laterais.....	92
Figura 42 - Coeficiente de atrito em superfície 7075-T6 (Ensaio 1)	93
Figura 43 - Coeficiente de atrito em superfície 7075-T6 (Ensaio 2)	93
Figura 44 - Coeficiente de atrito em superfície 7075-T6 nitretada (Ensaio 1)	94
Figura 45 - Coeficiente de atrito em superfície 7075-T6 nitretada (Ensaio 2)	94

Figura 46 - Coeficiente de atrito em superfície 7075-T6 Anodizada (Ensaio 1).....	95
Figura 47 - Coeficiente de atrito em superfície 7075-T6 Anodizada (Ensaio 2)	95
Figura 48 - Coeficiente de atrito em superfície 7075-T6 revestida com níquel duro químico (Ensaio 1)	96
Figura 49 - Coeficiente de atrito em superfície 7075-T6 revestida com níquel duro químico (Ensaio 2).....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Temperaturas de processo recomendadas(Material X Injetora X Molde)	26
Tabela 2 -	Valores orientativos de ganhos para moldes em alumínio de injeção.....	31
Tabela 3 -	Propriedades de materiais utilizados para fabricação de molde.....	32
Tabela 4 -	Comparativo dos tempos de injeção, capacete de esquia.....	34
Tabela 5 -	Classificações referente as ligas de as ligas de alumínio... ..	35
Tabela 6-	Tratamentos térmicos em ligas de alumínio	36
Tabela 7 -	Composição química da liga de alumínio 7075 tratável termicamente...	47
Tabela 8 -	Parâmetros utilizados na nitretação a plasma	49
Tabela 9 –	Processo de anodização dura em liga de alumínio 7075-T6.....	51
Tabela 10 –	Parâmetros e características do processo autocatalítico para revestimento com níquel duro.....	53
Tabela 11 -	Parâmetros dos ensaios de Pino disco.....	59
Tabela 12 -	Resultados ensaios de dureza HV.....	68
Tabela 13 -	Resultados dos ensaios de rugosidade Ra, Rz e Rt.....	66
Tabela 14 -	Áreas obtidas através da análise das pistas de desgaste.....	98
Tabela 15 -	Cálculo do volume de material removido.....	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	<i>Aluminum Association</i>
ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> (Instituto Americano de Ferro e Aço)
Al	Alumínio
AlN	Nitreto de Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
Ar	Argônio
ASM	<i>American Society of Materials</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
C	Carbono
Ca	Cálcio
CA	Camada anodizada
CAD	<i>Computer aided design</i> (Desenho assistido por computador)
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i> (Engenharia Assistida por Computador)
CCT	Centro de ciências tecnológicas
CO ₂	Dióxido de carbono
CPs	Corpos de prova
Cr	Cromo
Cu	Cobre
EDS	Espectroscopia de energia dispersiva
HV	Dureza Vickers
HRC	Escala de dureza Rockwell C
MEV	Microscópios eletrônicos de varredura
N ₂	Nitrogênio
NH ₃	Amônia
Ni	Níquel
Mg	Magnésio
Mo	Molibdênio
O ₂	Oxigênio
Ra	Rugosidade média
Rt	Rugosidade total
Rz	Rugosidade média das cristas

RPM	Rotações por minuto
T6	Solubilização e envelhecimento artificial
V	Tensão
VMR	Volume de material removido
Zn	Zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	19
1.1.1	<i>Objetivo Geral</i>	19
1.1.2	<i>Objetivos Específicos</i>	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	MOLDES PARA DE INJEÇÃO DE POLÍMEROS	21
2.1.1	<i>Materiais para fabricação de moldes para injeção de termoplásticos</i>	29
2.1.2	Moldes em alumínio	31
2.2	ALUMÍNIO E SUAS LIGAS	34
2.3	NITRETAÇÃO A PLASMA	38
2.4	ANODIZAÇÃO DURA	39
2.5	NÍQUEL DURO QUÍMICO	41
2.6	DESGASTE E ABRASÃO	43
3	METODOLOGIA	46
3.1	MATÉRIA PRIMA	47
3.2	TRATAMENTO SUPERFICIAL DE NITRETAÇÃO A PLASMA	47
3.3	TRATAMENTO SUPERFICIAL DE ANODIZAÇÃO DURA	50
3.4	TRATAMENTO SUPERFICIAL COM NÍQUEL DURO QUÍMICO	52
3.5	METALOGRAFIA	53
3.6	DUREZA	54
3.7	RUGOSIDADE	54
3.8	CONDUTIVIDADE TÉRMICA	55
3.9	ENSAIO DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO SOBRE DISCO	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4.1	ANÁLISE MICROGRÁFICA	61
4.2	DUREZA	67
4.3	RUGOSIDADE	69
4.4	CONDUTIVIDADE TÉRMICA	69
4.5	ENSAIO DE PINO DISCO	70
4.5.1	<i>Volume de material removido e topografia das pistas de desgaste</i>	73
5	CONCLUSÃO	79

5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	81
	REFERÊNCIAS.....	82
	APÊNDICE A – DESVIO NO PROCESSO DE NITRETAÇÃO A PLASMA.	91
	APÊNDICE B - ANÁLISE DO COEFICIENTE DE ATRITO.....	93
	APÊNDICE C - CÁLCULO DO VOLUME DE MATERIAL REMOVIDO	98

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda global por produtos termoplásticos em setores variados, que vai desde as indústrias automobilísticas, aeronáutica, agrícola, de alimentos, entre outras, são um reflexo da relevância obtida pelos termoplásticos ao longo dos anos. Isso devido ao constante aprimoramento no setor, que entrega produtos relativamente baratos e com opções para substituir uma gama de outros materiais em inúmeras aplicações.

Segundo Rashid et al. (2020) estima-se que o consumo energético mundial utilizado para operação de máquinas injetoras, resultem em uma emissão aproximadamente 80 milhões de toneladas cúbicas de CO₂ anualmente. Sabendo que o processo de resfriamento ocupa uma parte significativa do ciclo, sendo assim, este processo é fundamental para a redução do tempo do ciclo de injeção e aumento da eficiência energética do processo de moldagem por injeção.

Diversos fatores estão envolvidos no processo de moldagem por injeção e têm uma grande influência nas peças injetadas, como a formabilidade do material, características da máquina de moldagem, projeto do molde e condições do processo Spina (2004).

Kulkarni (2017), relata que a peça final injetada é um resultado de cinco fatores críticos, que precisam ser cuidadosamente selecionados, por saber: projeto da peça, seleção do material, projeto e construção do molde, máquina de moldagem e o processo de moldagem.

Conforme Duleba e Greskovic (2012) as propriedades ideais de peças plásticas podem ser encontradas somente quando a temperatura do molde definida é mantida durante o processo. A temperatura do molde afeta as propriedades mecânicas, o comportamento de contração, empenamento, qualidade superficial, tempo de ciclo e comprimento de fluxo em peças com paredes finas

O maior contribuidor para o tempo de ciclo é o tempo de resfriamento, sendo assim ele representa no processo de injeção normalmente 2/3 do tempo total de ciclo. Portanto, qualquer redução terá um grande impacto no tempo final de produção, Marques et al. (2015).

Goodship, Middleton e Cherrington (2016) observaram que o tempo de resfriamento entre a injeção e a extração da peça é responsável por pelo menos 60%

do ciclo de moldagem por injeção. Portanto, o tempo de resfriamento desempenha um papel importante na eficiência, no controle de qualidade e na produtividade de qualquer combinação de componentes e ferramentas.

A diminuição no tempo de ciclo do processo de injeção, especialmente o tempo de resfriamento, tem sido um desafio, pois corresponde por até 70% do tempo total de ciclo. Afetando diretamente os custos de produção, a produtividade e a qualidade das peças fabricadas, Park et al. (2017).

O uso de ligas de alumínio é limitado em função de sua relativa baixa dureza e resistência ao desgaste. Comparados ao material base, os filmes obtidos por anodização dura apresentam maior espessura, melhor aderência, maior resistência à corrosão e à abrasão, além de uma dureza superior. Esse tipo de anodização é comumente aplicado em ligas de alumínio que possuem menos de 5% de cobre e menos de 7% de silício em sua composição, Stevenson (1994).

Dentre as ligas de alumínio empregadas grandemente na indústria aeronáutica, destacam-se especificamente as séries 2XXX, 7XXX e 8XXX, distinguem-se pelos seus elevados valores de resistência mecânica. Estas propriedades, combinadas com a reduzida densidade característica do alumínio com sua excelente conformabilidade e usinabilidade, estabelecem este metal como uma alternativa privilegiada na manufatura de componentes e estruturas. As ligas pertencentes à série 7XXX destacam-se por apresentar a maior tenacidade dentre todas as ligas destinadas a aplicações aeronáuticas. Adicionalmente, quando comparadas a outras categorias de ligas, estas demonstram um desempenho significativamente superior ao observado em diversos aços de alta resistência mecânica. Contudo, tais ligas apresentam complexidades inerentes aos seus processos de fabricação, (Coutinho, 1992 e Moreira, 2011).

Disse Arieta, F. et al. (2019) as ligas de alumínio têm sido amplamente utilizadas na indústria de transformação de materiais poliméricos, especialmente nos processos de injeção sob baixa pressão, como sopro e termoformagem. No entanto, no caso de moldes de injeção sob pressão, ainda é bastante limitado seu uso. Em diversos países, como Alemanha, França, Reino Unido, Itália, Estados Unidos e Japão, as ligas de alumínio de maior resistência, por exemplo, as ligas da família 7XXX (alumínio-zinco-magnésio com cobre, Al-Zn-Mg-Cu), têm sido empregadas há

mais de duas décadas em moldes de injeção. Substituindo os aços AISI P20 e outros metais utilizados na fabricação de moldes de injeção.

Neste contexto cada fase do desenvolvimento de um molde para injeção de termoplásticos é essencial para garantir um processo produtivo e eficiente. Nesse sentido, o projeto deve considerar diversos fatores com o objetivo de alcançar a melhor otimização possível. A eficiência e os custos de fabricação do molde são diretamente afetados por aspectos como o tipo de material utilizado, as dimensões do molde, a complexidade da peça a ser injetada e a quantidade de cavidades projetadas. A fabricação do ferramental em alumínio possui uma variedade de benefícios que podem ser obtidos desde o processo de produção do molde, onde o tempo de usinagem para produção, o desgaste do equipamento e das ferramentas são menores. A reciclabilidade, o menor peso do molde produzido em alumínio também é uma grande vantagem, além da melhor condutividade térmica do material, que contribui para um processo de injeção com alta produtividade. Embora essas características ajudem a obter tempos de ciclo mais baixos e reduzir desperdícios, também alguns estudos têm demonstrado que os moldes de alumínio podem ser utilizados para produzir peças plásticas com melhor precisão e acabamento superficial. Uma infinidade de fatores exerce influência para obtenção de um processo de injeção de polímeros com alta produtividade. A utilização do alumínio como metal de base para fabricação de moldes foi estudada através de diferentes tratamentos superficiais em liga de alumínio 7075-T6, propostos para melhoria das propriedades mecânicas da liga.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a utilização da liga de alumínio 7075-T6 para fabricação de moldes para injeção de polímeros com alta produtividade, analisando o efeito dos processos de nitretação a plasma, anodização dura e revestimento de níquel duro químico, para melhoria das propriedades mecânicas e tribológicas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Compreender a viabilidade técnica e econômica da utilização do alumínio como material de base para fabricação de moldes;
- b) Estudar a nitretação a plasma em liga de alumínio 7075-T6, utilizada como metal base para fabricação de moldes para injeção de polímeros;
- c) Analisar os benefícios da anodização dura em liga de alumínio 7075-T6, utilizada como metal base para fabricação de moldes para injeção de polímeros;
- d) Avaliar o revestimento com níquel duro químico em liga de alumínio 7075-T6, utilizada como metal base para fabricação de moldes para injeção polímeros;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura abordando importantes aspectos relativos à injeção de termoplásticos, com ênfase na melhoria das propriedades mecânicas da liga de alumínio 7075-T6, através de tratamentos superficiais.

2.1 MOLDES PARA DE INJEÇÃO DE POLÍMEROS

Pode-se afirmar que o molde é extremamente relevante para obtenção de um processo de injeção com alta qualidade e produtividade. O preenchimento das suas cavidades com a massa polimérica fundida, por meio de pressão e um correto resfriamento para solidificação das peças, estão diretamente ligados a qualidade do molde, entre outros fatores.

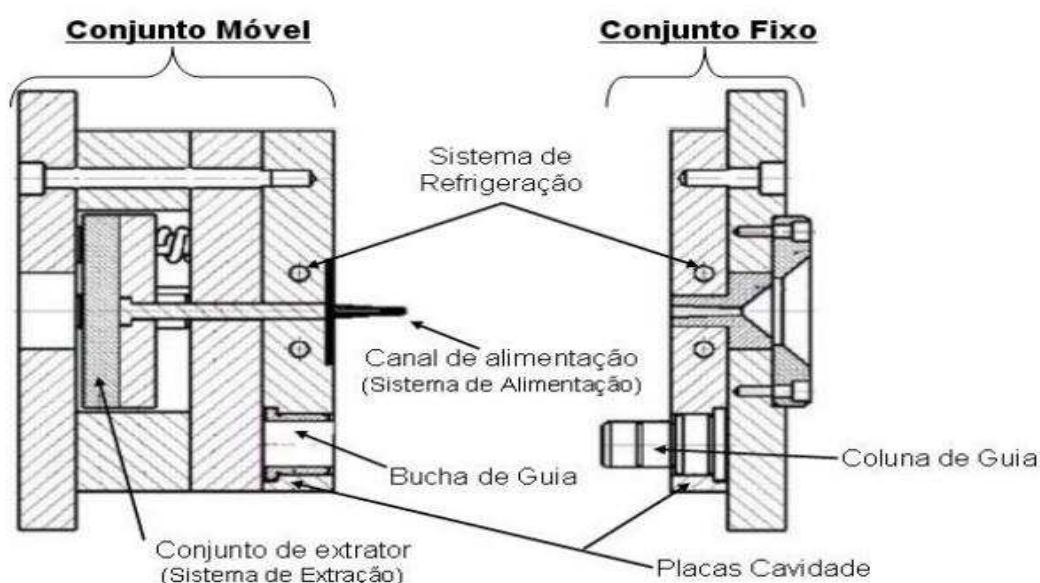
Conforme Harada (2004), o cuidadoso projeto de um ferramental (molde de injeção) é a principal atividade a ser realizada, para se garantir um alto nível de produtividade com um baixo nível de manutenção, para isso existe a necessidade de que todos os fatores técnicos sejam analisados durante o processo de desenvolvimento do projeto de um ferramental, para que sejam minimizadas as possibilidades de falhas.

Kulkarni (2017) disse que existem 11 parâmetros primários de processo nas máquinas injetoras que exercem influência direta na qualidade do produto injetado. Uma somatória de vários parâmetros, caracterizam um processo de moldagem bem-sucedido, como pressão, velocidades, tempos e temperaturas adequadas. Dentre os parâmetros destacam-se: o tempo de refrigeração (1), a temperatura do material fundido (4), a pressão de injeção (5), a velocidade de injeção (6), a temperatura do molde (11), a pressão (12) e o tempo de recalque (13).

Conforme Steinko (2004), é fundamental a elaboração de um projeto bem dimensionado do produto a ser moldado (peça), um otimizado o projeto do ferramental a ser construído (molde) e a definição do processo mais adequado (produção). Esses são aspectos essenciais para a obtenção de peças com alta qualidade, baixos tempo de ciclo e custos associados ao componente termoplástico injetado.

Sendo assim, conforme ilustrado na Figura 1, um molde de injeção é constituído por um conjunto fixo e outro móvel, os quais são confeccionados obtendo uma ou mais cavidades que dão forma ao produto.

Figura 1 - Configuração básica do molde de injeção



Fonte: Silva, (2009)

Um bom projeto de molde para injeção de termoplásticos, deve contemplar seus sistemas de funcionamento e parâmetros associados, que são essenciais para um pleno e otimizado desempenho do processo. Como destaque podem ser citados três sistemas: o sistema de alimentação, sistema de extração e o sistema de refrigeração. Dentre estes três o sistema de refrigeração representa um impacto significativo quando do projeto dos moldes.

Kennedy (2008), Catic et al. (2006) e Ogliari et al. (2007), consideram que o molde é um dos itens, com maior complexidade a ser desenvolvido, dentro das fases de um projeto para obtenção de uma peça injetada. Sendo fundamental levar em consideração que os elementos do molde devem, garantir que o material polimérico seja transformado na peça desejada. Necessitando assim, profissionais com conhecimentos especializados e mão de obra qualificada para a elaboração e confecção de molde de injeção.

No Brasil, estima-se que em 90% dos casos as empresas que necessitam de moldes e matrizes de alta tecnologia e com sofisticados sistemas de injeção, fazem

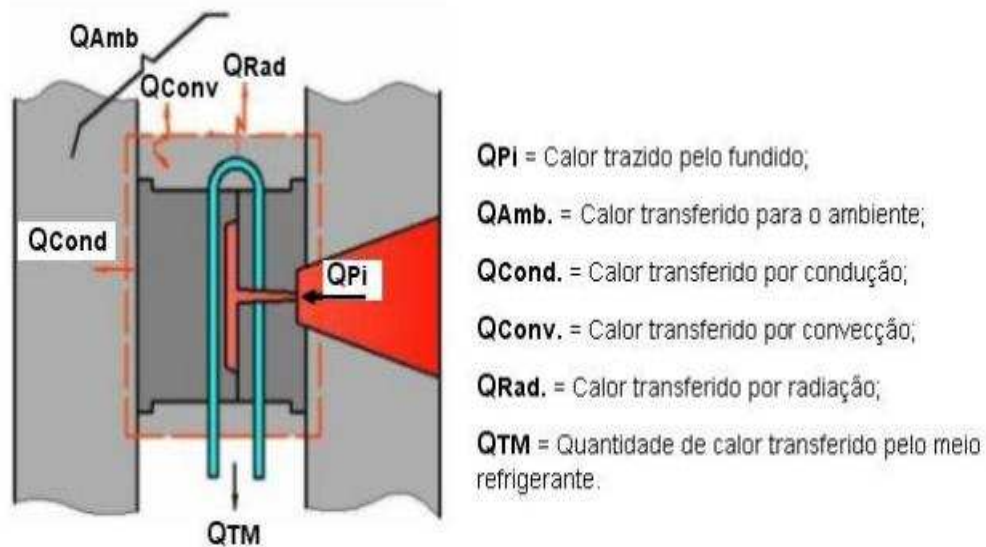
aquisição de produtos importados. Isso deve-se, além das questões técnicas e tecnológicas, o custo e o prazo de entrega dos moldes são apontados como os principais diferenciais estratégicos, oferecidos pelas ferramentarias estrangeiras, Arieta et. al. (2019).

Para Postawa *et al.* (2008) e Pirc *et al.* (2007), a transferência de calor, que ocorre durante o processo de moldagem por injeção, possui grande relevância na qualidade das peças produzidas, assim como sobre o tempo do ciclo de moldagem. Uma boa localização do sistema de refrigeração é um fator de grande importância na confecção do molde, sabendo que o tempo de resfriamento pode corresponder por até 70 % do ciclo de injeção.

Segundo Manrich (2005), para obtenção de peças com boa qualidade e tempo de ciclo produtivo eficiente, é fundamental que, além da boa condição e especificação da máquina injetora, o molde seja projetado de forma eficiente, quanto aos sistemas que o compõe (alimentação, extração e refrigeração). Deve-se observar o adequado uso de equipamentos auxiliares, tais como: controladores de temperatura do molde, sistemas de transporte e secagem da matéria-prima, assim como, sistemas para manuseio e transporte das peças moldadas.

Para Brito et al. (2004), um bom sistema de refrigeração possibilita consolidar a fase de resfriamento (dissipação de calor da massa moldada), esse processo faz parte do ciclo de injeção para uma ou mais peças. O processo de resfriamento do molde de injeção tem como sua finalidade diminuir, de maneira rápida e constante, a temperatura da peça moldada até atingir o estado sólido. O processo que envolve a fase de resfriamento do molde depende de fatores como: a temperatura externa da superfície do molde, do ambiente que rodeia o molde e da resina a ser injetada, conforme Figura 2.

Figura 2 - Transferência de Calor em um Molde

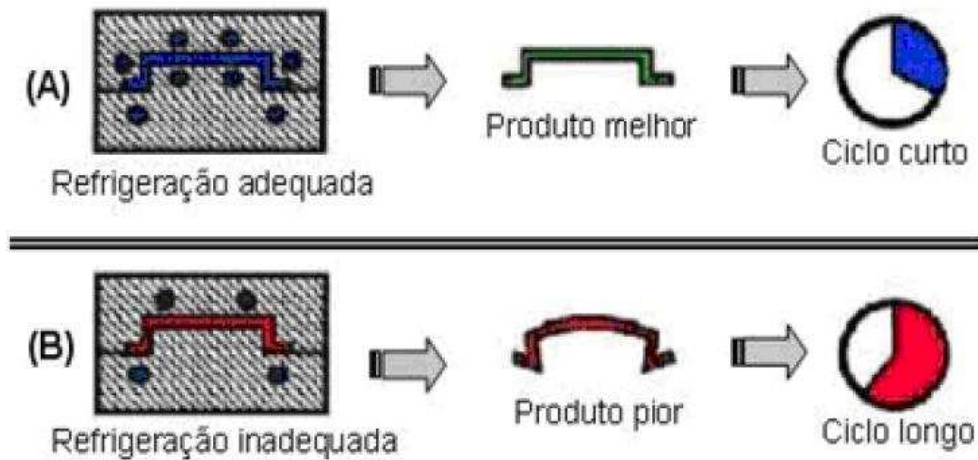


Fonte: Brito et al 2004

- **Convecção (Q_{conv})** - A convecção pode ocorrer de duas formas, a primeira através da convecção natural entre a superfície do molde, com o ambiente que o circunda (Q_{Amb}) durante todo o processo de injeção e a segunda forma através da convecção forçada, quando o fluido refrigerante é bombeado em canais de refrigeração (Q_{TM}) ou mesmo, por resfriamento através do sopro de ar no molde aberto;
- **Condução (Q_{cond})** - Ocorre no processo de transmissão do calor do polímero fundido, fluindo através dos componentes do molde, até chegar aos canais de refrigeração;
- **Radiação (Q_{rad})** – Ocorre a transferência do calor por radiação, através do molde para o ambiente que o circunda (Q_{Amb}).

Segundo Hassan *et al.* (2010) e Silva (2009), o eficaz controle da velocidade com que acontece o processo de resfriamento da peça injetada é de importância ímpar, pois proporcionará as mais adequadas condições ao fluxo do material no interior do molde, garantindo o resfriamento ideal, podendo até mesmo, eliminar defeitos aparentes na peça, reduzindo custos, aumentando a qualidade e a produtividade do processo. A Figura 3 ilustra um comparativo entre refrigeração adequada e inadequada no molde.

Figura 3 - Mecanismo de refrigeração adequado (A) e inadequado (B).



Fonte: Silva (2009)

Para Park e Dang (2012), quando ocorre a estabilização da troca de calor, o fluxo de calor realizado para o molde e o fluxo de calor removido do molde alcançam o equilíbrio. A troca de calor é apresentada pela equação:

$$Q_m + Q_c + Q = 0$$

Q_m - A troca de calor com o fundido

Q_c - A troca de calor com a refrigeração

Q - A troca de calor com o ambiente.

Segundo Sacchelli e Cardoso, (2013) na saída da máquina injetora o material polimérico normalmente está a uma temperatura de aproximadamente 230°C e o molde a 30°C. A troca de calor ocorre entre o molde e a massa polimérica fundida, por consequência, causando um constante aumento da temperatura do molde até que ocorra sua estabilização.

Em materiais como o policarbonato a temperatura no bico de injeção pode variar na faixa dos 300°C e a temperatura de trabalho no molde pode ser superior à 100°C, conforme demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Temperaturas de processo recomendadas (Material x Injetora x Molde)

Recomendações de temperaturas em cada zona do canhão de injetoras

MATERIAL	SÍMBOLO	BICO	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4	ZONA 5	MOLDE
Polietileno de alta densidade	PEAD	210-240	220-250	210-240	190-220	190-220	30-50
Polipropileno	PP	240-270	240-270	230-260	220-250	220-250	30-50
Poliestireno	PS	220-280	210-280	180-230	150-180	150-180	30-50
Acrilonitrilo Butadieno Estireno	ABS	210-240	210-240	200-300	190-220	190-220	60-80
Estireno acrilonitrilo	SAN	200-230	190-220	190-220	180-210	180-210	50-70
Policloreto de vinila flexível	PVC	150-180	150-180	140-170	130-160	130-160	20-40
Policloreto de vinila rígido	PVC	170-200	170-200	160-190	150-180	150-180	40-60
Polimetacrilato de metila	PMMA	200-220	190-210	180-200	170-190	170-190	50-80
Polioximetileno Homopolímero	POM	190-210	180-200	170-190	170-190	170-190	60-90
Polioximetileno Copolímero	POM	180-200	170-190	170-190	160-180	160-180	60-90
Policarbonato	PC	290-310	300-320	290-310	280-300	280-300	80-120
Poliamida 6	PA6	230-250	230-250	220-240	210-230	210-230	60-80
Poliamida 6.6	PA6.6	260-280	260-280	250-270	240-260	240-260	60-100
Polibutireno Tereftalato	PBTP	240-260	230-250	230-250	210-230	210-230	60-80
Acetato de celulose	CA	190-220	210-230	200-220	190-210	190-210	40-60
Polioxifenileno	PPO	270-290	280-300	270-290	250-270	250-270	80-100

Fonte: Adaptado Moartelli (2024)

Conforme Duleba e Greskovic (2012) o tempo de resfriamento é proporcional ao quadrado da maior espessura da parede da peça somada ao maior diâmetro do canal de refrigeração elevado à potência de 1.6, sendo também inversamente proporcional à difusibilidade térmica do polímero fundido. Essas relações são representadas pela equação:

$$Tc = \alpha(TH_w^2 + Dr^{1.6})\alpha \frac{1}{a}$$

Tc - É o tempo de resfriamento

TH_w^2 - É a maior espessura da parede da peça

Dr - É o maior diâmetro do canal de refrigeração

α - É a difusividade térmica do polímero fundido.

Para Venerus et al. (1999) a equação da difusividade térmica do polímero fundido é expressa de acordo com a equação:

$$a = \frac{K}{\rho C_v}$$

K - É a condutividade térmica

ρ - É a densidade

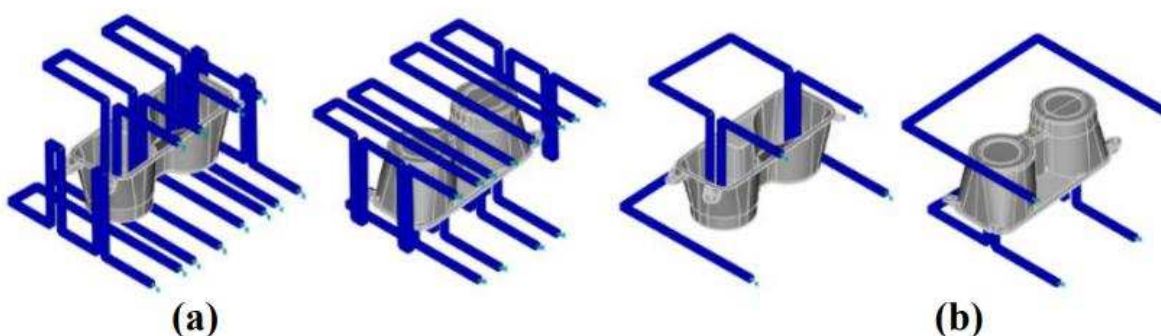
C_v - É o calor específico a volume constante

a - É a difusividade térmica do polímero fundido.

Podem ocorrer oscilações nos tempos de cada ciclo, incluindo o tempo de resfriamento, devido variáveis como a matéria prima utilizada, a espessura da peça injetada, a pressão da injeção, a temperatura ambiente, entre outros Saifullah *et al.* (2009) e Malloy (2000).

Para Pereira et. al. (2023), tendo em vista que materiais com propriedades distintas podem ser utilizados para fabricação dos moldes, foram projetados diferentes *layouts* para os sistemas de resfriamento. Para o molde de aço um sistema com 6 canais (4 superiores e 2 inferiores), já para o molde de alumínio um sistema com 2 canais (1 superior e 1 inferior), todos os canais com diâmetros de 11,5mm. Na sequência, seguem modelos tridimensionais dos sistemas de refrigeração de moldes produzidos em aço AISI P20 e alumínio 7075-T6, para fins comparativos. A Figura 4 (a) e (b) demonstram os sistemas de resfriamento para ambos os moldes.

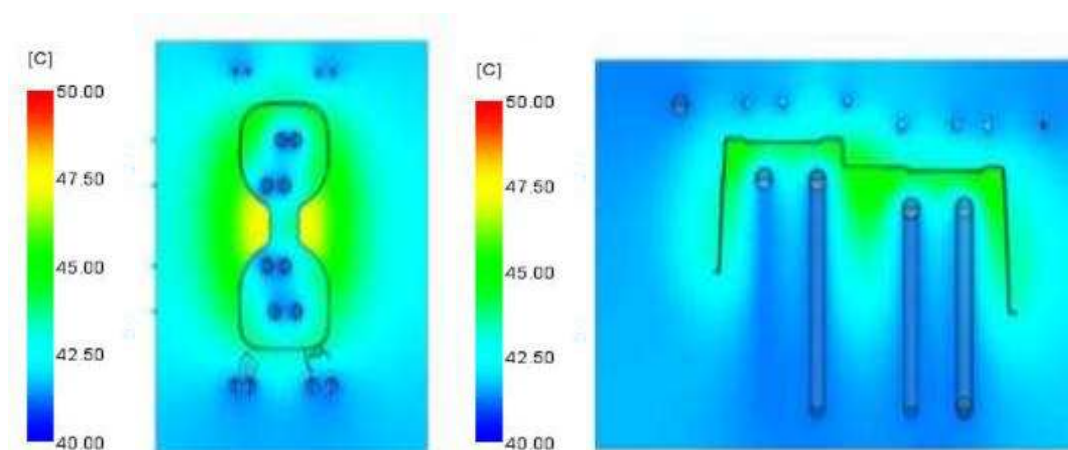
Figura 4 - Layout do sistema de resfriamento: (a) molde de aço P20 e (b) molde alumínio



Fonte: Pereira et. al. (2023)

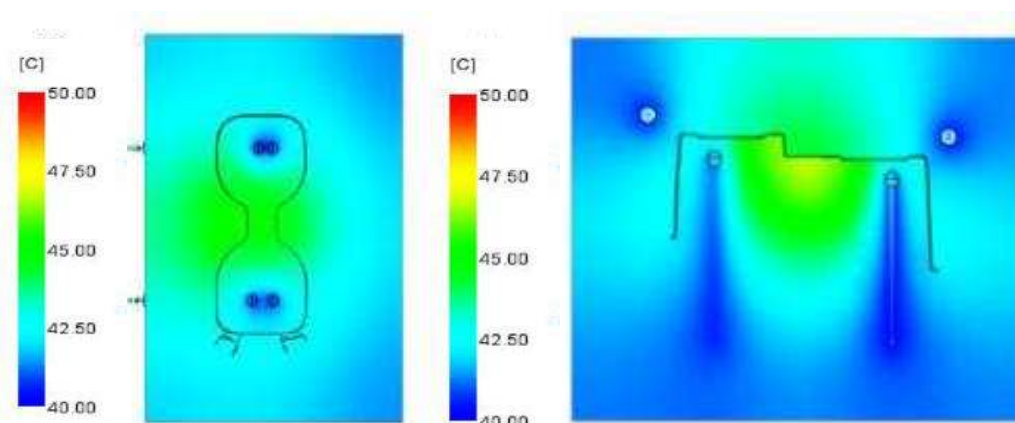
Segundo Pereira et. al. (2023), após análises dos resultados obtidos para resfriamento dos sistemas propostos, optou-se pela adoção de 33°C como temperatura do fluido de resfriamento para o molde de aço P20 e a temperatura de 40°C foi adotada para o fluido do molde fabricado em alumínio. Para o molde de aço AISI P20, como resultado, observou-se que a temperatura do fluido na saída do canal apresentou um aquecimento de 1,4°C, porém em contrapartida, a temperatura do fluido apresentou um aquecimento de somente 0,59°C na saída do canal do molde fabricado em alumínio 7075-T6. Tendo como base comparativa a temperatura de saída dos sistemas, considera-se o circuito que possui uma menor variação, como mais homogêneo e eficiente. As figuras 5 e 6 ilustram a distribuição de temperatura no interior de moldes similares fabricados aço P20 e alumínio 7075-T6 .

Figura 5 - Distribuição de temperatura no molde de aço



Fonte: Pereira et. al. (2023)

Figura 6 - Distribuição de temperatura no molde de alumínio



Fonte: Pereira et. al. (2023)

A performance do sistema de resfriamento exerce influência direta sobre a qualidade final e a duração do processo de resfriamento do componente moldado. Pelo menos 60% das falhas visualmente detectáveis identificadas em componentes produzidos por injeção podem ser correlacionados com deficiências no sistema de refrigeração, Huamin et al. (2008).

2.1.1 Materiais para fabricação de moldes para injeção de termoplásticos

Para Baretta (2007) os materiais utilizados para a fabricação de um molde de injeção são de extrema importância nos mais variados sistemas envolvidos (alimentação, extração, refrigeração, estrutura e cavidades). Sendo selecionados de acordo com as características desejada para cada projeto. Podendo ser construídos por diferentes tipos, que vão desde os aços de alta liga (para grandes séries), aços carbono (peças menos críticas e séries curtas), ligas de alumínio ou zinco (séries muito curtas ou protótipos), materiais não metálicos e metálicos – conhecidos como moldes híbridos (produção de até 2.000 ciclos) e as resinas epóxi.

Disse Barbosa (2020) que os moldes podem ser feitos de diversos materiais, sendo a aplicação o principal fator de escolha, normalmente o aço é o mais utilizado por causa das suas características mecânicas. Os aços mais usados são o AISI H13, AISI P20, AISI 1045 e outros, sendo que, um aço do molde deve ser adequado a produção e resina que será injetada.

O tradicional aço AISI P20, composição química nominal dos elementos principais, com aproximadamente 0,4% de Carbono (C) - 1,5% de Manganês (Mn) - 1,9% de Cromo (Cr) - 0,2% de Molibdênio (Mo), na condição pré-beneficiado (temperado e revenido , e tipicamente com dureza aproximada de 28-32 HRC), vem sendo o material mais utilizado em todo o mundo para fabricação moldes de injeção de termoplásticos em geral (polietileno, polipropileno, policarbonatos, poliestireno, ABS, entre outros). Isso deve-se principalmente ao fato de seu relativo baixo custo, fácil disponibilidade no mercado, boa usinabilidade, vida útil com condições de uso satisfatória após algumas centenas de milhares ou milhões de injeções realizadas.

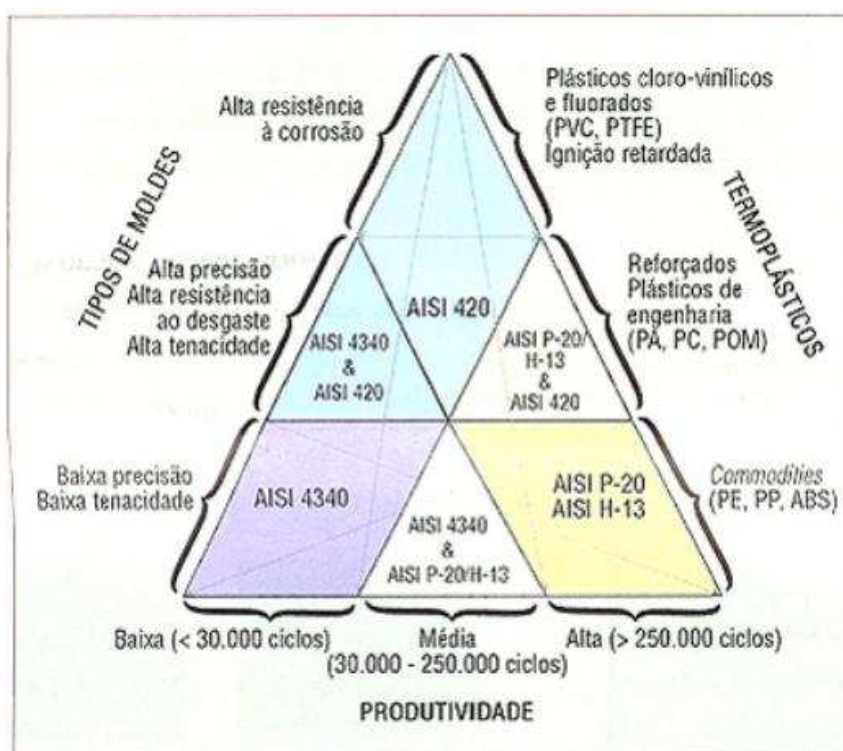
Afirma Sant'Anna (2011) que devido as inúmeras características do aço P20, este é o aço mais vendido no Brasil para fabricação de moldes, sendo empregado em

mais de 80% dos casos, devido sua maior qualidade e custo/benefício no projeto de moldes.

Souza et al. (2024) investigaram os efeitos dos diferentes materiais empregados na fabricação de insertos para moldagem por injeção, priorizando especialmente a otimização do tempo de ciclo de injeção. Os resultados principais demonstraram uma diminuição de 46% no tempo de ciclo de moldagem por injeção quando utilizados insertos de CuBe (cobre berílio) comparativamente ao aço AISI P20. Estes achados corroboram que a seleção adequada do material para zonas específicas constitui um elemento crucial para a eficiência do sistema de resfriamento.

O diagrama para escolha de aço, representado na Figura 7, tem como objetivo contribuir orientando na seleção do aço mais adequado para cavidades, abrangendo informações essenciais ao projeto de moldes, como a especificação da resina termoplástica empregada, suas cargas adicionadas, considerando as principais solicitações do molde e a produtividade almejada.

Figura 7 - Diagrama orientativo na escolha do aço para fabricação de cavidades em moldes.



Fonte: Moratelli e Costa (2017)

2.1.2 Moldes em alumínio

Tendo em vista que o alumínio é o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, sendo o mais utilizado para fabricação de moldes, entre os elementos não-ferrosos. Destacando-se por suas propriedades, entre elas, a sua excelente alta condutividade térmica e elétrica, ductilidade, maleabilidade, seu o baixo peso específico e por sua fácil reciclagem, ASM (1990).

A utilização de moldes em ligas de alumínio é uma boa alternativa aos tradicionais moldes fabricados em aço. Atualmente já são empregados, eventualmente, para os chamados moldes-protótipo, para a fabricação de pequenos lotes de peças. Acredita-se que a utilização de moldes em alumínio seja limitada, pois nas superfícies de fechamento eventualmente ocorre desgaste superficial elevado e amassamento/deformação. A escolha por estes moldes para produção de protótipos deve-se a rapidez na sua produção e menor custo comparado aos moldes tradicionalmente produzidos em aço, King (2016). A tabela 2 apresenta os valores percentuais característicos de incremento obtidos em ferramentais de injeção plástica fabricados com ligas da série 7XXX em substituição aos moldes convencionais produzidos em aço AISI P20.

Tabela 2 - Valores orientativos de ganhos para moldes em alumínio de injeção

Parâmetros alumínio série 7XXX vs aço P20	Valores típicos de redução (%)
Custo do material	0 à +30
Tempo e custo de usinagem	-10 à -40
Custo final do molde	-20 à -40
Tempo de ciclo de injeção total	-20 à -60
Custo final de produção por peça injetada	-20 à -60

Fonte: Adaptado Arieta et. al. (2019)

A aplicação de ligas de alumínio na fabricação de moldes destinados à injeção de materiais termoplásticos proporciona uma diminuição aproximada de 30% no período necessário para o resfriamento dos componentes moldados, quando comparada ao emprego de aços convencionais, considerando-se condições equivalentes de fluxo volumétrico e temperatura do fluido refrigerante, Rashid et al. (2020).

Para Starks (2016), a aplicação bem-sucedida de ligas de alumínio como cavidades definitivas em moldes de injeção de alta produtividade, devem ser observadas algumas diferenças no projeto do molde, tratamentos térmicos, tratamentos superficiais e as particularidades nos ajustes de processo de injeção. Sendo assim, para difundir o uso de moldes de alumínio é essencial antes mapear estas diferenças, analisando todos os tempos e características peculiares, para a posterior difusão do conhecimento na indústria plásticos. É necessário também determinar as melhores práticas de forma a aumentar a longevidade de um molde utilizando ligas, em especial a promissora série 7XXX.

Em virtude de suas propriedades térmicas superiores, com a condutividade térmica 4,5 vezes maior e difusividade térmica 8 vezes superior em relação aos aços AISI P20 (bem como diversos outros aços), observou-se uma redução substancial no tempo de ciclo de injeção, Arieta et. al. (2019). A Tabela 3 descreve comparativamente as propriedades de diferentes materiais utilizados para produção de moldes.

Tabela 3 - Propriedades de materiais utilizados para fabricação de molde

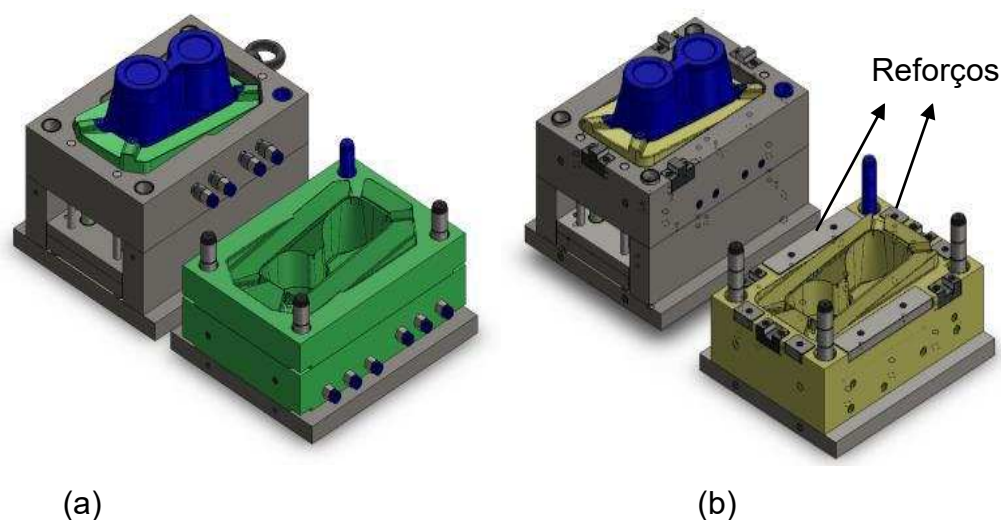
Material	Densidade (kg/m ³)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Dureza (HB)	Condutividade Térmica (W/m·K)	Difusividade Térmica (m ² /s)	Coefficiente de Expansão Térmica (m/m·K)
AISI 1045 Recozido	7.840	210	180/190	(à 100°C) 51	10 x 10 ⁻⁴	(20-100°C) 12,3
AISI P20 Pré-tratado	7.860	210	280/325	(à 100°C) 34	8 x 10 ⁻⁴	(20-100°C) 12,4
Liga Cu-Be	8.300	135	≈ 400	(à 200°C) 190	65 x 10 ⁻⁴	(0-300°C) 17,0
Alumínio 7075 -T6	2.820	72	160/190	(à 100°C) 153	63 x 10 ⁻⁴	(0-100°C) 23,7

Fonte: Adaptado Arieta et. al. (2019)

A Figura 8 (a) ilustra o projeto para fabricação de um molde em aço AISI P20 na região das placas cavidades (destacadas em verde) e aço 1045 nas demais placas. No molde fabricado em alumínio, Figura 8 (b), utilizou-se a liga de alumínio 7075-T6 para fabricação das placas cavidades (destacadas em amarelo) e aço 1045 nas demais em placas. Para reforçar as cavidades do molde, fabricado em alumínio,

sapatas foram adicionadas em pontos suscetíveis ao desgaste proveniente da etapa de fechamento durante o ciclo de injeção, Ferreira et al. (2023).

Figura 8 – Projetos de molde, a) molde fabricado em P20 e b) molde fabricado em liga de alumínio 7075-T6



Fonte: Adaptado Ferreira et al. (2023)

Segundo Arieta, F. et al. (2019), a propagação de moldes concebidos com materiais de superior usinabilidade e condutividade térmica, resultarão em ganhos de produtividade e diminuição do custo final da peça injetada. Essa tendência do mercado de produtos plásticos injetados, provoca consequências nas cadeias de fabricação dos moldes e no processo de injeção possibilitando ganhos de produtividade e diminuição de custo da peça injetada.

Existem documentados diversos casos de aplicação bem-sucedidas de molde em alumínio descritos na literatura. Um exemplo é o capacete para esqui na neve, produzido na Itália, o molde produziu mais de 800.000 capacetes, com uma redução de 68% no tempo de ciclo em relação ao molde de aço. Excelentes resultados também foram obtidos em análise desenvolvida para a produção de um modelo de capacete para esqui, em estudo comparativo entre molde de aço P20 e liga de alumínio 7XXX. Os resultados obtidos com a utilização do molde de alumínio, podem ser observados na Tabela 4. As análises evidenciam a redução de 68% no tempo total de ciclo para produção da peça, no molde em liga de alumínio 7XXX.

Tabela 4 - Comparativo dos tempos de injeção, capacete de esqui

Molde	Ciclo de Injeção (segundos)	Deformação (mm)	Ganho Ciclo de Injeção
Aço P20	28	2,3	≈ 15 %
Liga 7XXX	24	1,3 a 1,4	
Aço P20	75	1,3 a 1,4	≈ 70 %

Fonte: Arieta et al. (2019)

A Honda dos EUA possui o caso documentado, da proteção interna de paralamas para caixa de roda do veículo Honda Accord, onde um molde de liga de alumínio série 7XXX, produziu mais de 886000 peças em 5 anos, com uma redução de 20% no tempo de injeção comparado ao molde similar em P20.

2.2 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

O alumínio representa o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre e constitui o metal não-ferroso de maior aplicação industrial. Em virtude de suas propriedades, particularmente sua baixa densidade, elevada condutividade térmica e elétrica, características de ductilidade e maleabilidade. Outro destaque é a viabilidade de reciclagem, assim, este elemento adquiriu posição muito relevante no contexto industrial global, ocupando a segunda posição em termos de consumo mundial, superado apenas pelo ferro, ASM (1990). A expansão do uso do alumínio e de suas ligas nas indústrias de automóveis e aviação é limitada, sobretudo, pela sua pouca dureza na superfície e baixa resistência ao desgaste, Moradshahi et al. (2006).

O sistema de classificação para ligas de alumínio trabalháveis mecanicamente define um número com 4 dígitos (XXXX) e 3 dígitos seguido por um valor decimal (XXX.X), para as ligas fundidas. O primeiro dígito em ambos os casos, identifica o principal elemento de liga, ao passo que os dígitos posteriores determinam propriedades específicas de cada liga. Na Tabela 5 estão apresentadas as classificações referente as ligas trabalháveis mecanicamente Weingaertner e Schroeter (1990).

Tabela 5 - Classificações referente as ligas de as ligas de alumínio

Ligas Trabalháveis Mecanicamente		
Série (AA)	Elemento Majoritário	Sistema de Ligas
1XXX	Al comercial	_____
2XXX	Cu	Al-Cu , Al-Cu-Mg
3XXX	Mn	Al-Mn, Al-Mn-Mg
4XXX	Si	Al-Si
5XXX	Mg	Al-Mg
6XXX	Mg,Si	Al-Mg-Si
7XXX	Zn	Al-Zn, AlZnMg, AlZnMgCu
8XXX	Sn,Li,Fe,Cu	Al-Li, Al-Fe.....

Fonte: *The aluminium association* (2006)

Para Kavalco (2011), as ligas pertencentes às séries 2XXX e 7XXX são comumente submetidas a tratamentos térmicos de endurecimento por precipitação com o objetivo de alcançar propriedades mecânicas superiores. Essas ligas encontram aplicação em situações que demandam a associação entre elevada resistência mecânica e reduzida densidade, sendo amplamente empregadas em setores como a indústria aeroespacial.

A finalidade do endurecimento por precipitação consiste em desenvolver uma distribuição homogênea e refinada de partículas precipitadas dispersas na matriz metálica. As propriedades mecânicas de resistência em materiais cristalinos estão intrinsecamente associadas à capacidade de impedir o deslizamento das discordâncias através da microestrutura, sendo que os precipitados formados funcionam como barreiras efetivas que restringem as movimentações, Barbosa (2014).

Quando se trata do endurecimento por precipitação, a finalidade dos tratamentos térmicos consiste em dissolver as fases intermetálicas sob temperaturas elevadas, promovendo subsequentemente sua precipitação através de resfriamento rápido e envelhecimento em temperaturas comparativamente inferiores, Oliveira (2012).

Conforme a ASM (1990), as ligas tratáveis termicamente, dependendo do tratamento que recebem, terão uma designação que as caracterizem. A liga AA7075-T6, por exemplo, refere-se à liga 7075 no estado solubilizado total e envelhecimento artificial. Por convenção, as ligas tratáveis termicamente são representadas com a

letra maiúscula T, seguida por um ou mais dígitos, os principais tratamentos seguem demonstrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Tratamentos térmicos em ligas de alumínio

Nomenclatura	Tratamento Térmico
T1	Solubilização parcial e envelhecimento natural
T2	Recozimento
T3	Solubilização total e deformação a frio
T4	Solubilização total e envelhecimento natural
T5	Apenas envelhecimento artificial
T6	Solubilização total e envelhecimento artificial
T7	Solubilização e estabilização
T8	Solubilização, deformação a frio e envelhecimento artificial
T9	Solubilização, envelhecimento artificial e deformação a frio

Fonte: *The aluminium association* (2009)

Sendo a liga de alumínio AA7075-T6 conhecida por apresentar ótima usinabilidade, alta resistência específica e boa conformabilidade. Porém, apresenta baixa dureza superficial e resistência ao desgaste, o que restringe suas aplicações. Uma alternativa testada para melhoria das propriedades é o processo de nitretação a plasma, uma vez que o nitreto de alumínio pode apresentar propriedades interessantes, tais como alta dureza superficial, resistência à corrosão, boa usinabilidade e alta condutividade térmica, Reis.et.al. (2016).

Segundo a ASM (2004), o tratamento térmico mais utilizado para promover melhorias nas propriedades mecânicas da liga 7075 é denominada têmpera classe T6, composta por três principais fases.

- Solubilização;
- Têmpera ou resfriamento brusco;
- Endurecimento por precipitação ou envelhecimento;

A Figura 9 demonstra as fases típicas do tratamento térmico, denominado T6, para a liga 7075. Onde o resultado principal observado é o aumento da dureza superficial do material, devido a presença de precipitados endurecidos e o aumento da resistência a corrosão.

Figura 9 - Desenho esquemático do tratamento térmico T6 para liga de alumínio 7075.



Fonte: Camarinha (2018)

Os tratamentos superficiais de endurecimento são métodos utilizados para aumentar tanto a dureza da superfície quanto a resistência à fadiga dos materiais. A maioria dessas técnicas visa melhorar a dureza e/ou a resistência ao desgaste superficial, reduzir o atrito (minimizando a adesão) ou ainda proporcionar maior proteção contra a corrosão, Maloney (1992).

A qualidade do acabamento superficial pode influenciar significativamente a vida em fadiga dos componentes. Isso ocorre porque imperfeições na superfície, como os concentradores de tensão, que podem comprometer a resistência à fadiga. Em muitos casos, os processos de usinagem introduzem não apenas defeitos superficiais, mas também tensões residuais de tração, que favorecem o surgimento e a propagação de trincas, reduzindo assim a durabilidade do material. Dessa forma, a aplicação de tratamentos que promovam melhores acabamentos superficiais, contribui para o aumento da resistência e da vida útil em fadiga, por meio da modificação da microestrutura, da composição química ou das tensões residuais na superfície do material. Dowling (2007) e Callister (2007).

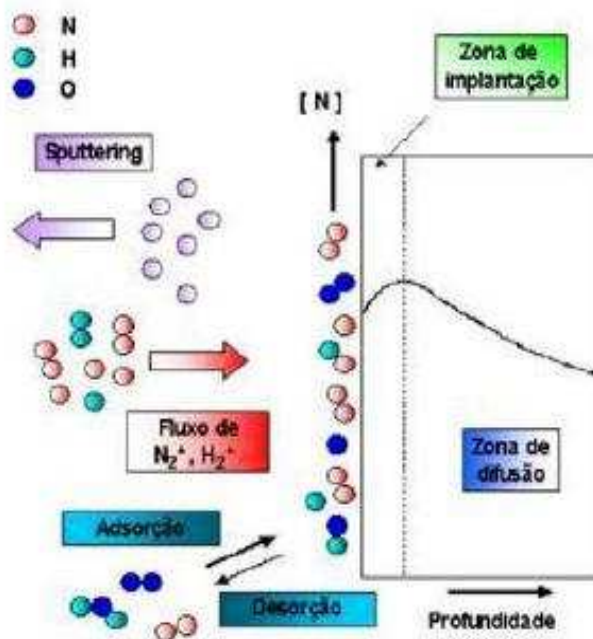
2.3 NITRETAÇÃO A PLASMA

A nitretação é um tratamento termoquímico cujo objetivo é introduzir átomos de nitrogênio na superfície de um material por meio de difusão, através do aquecimento em temperaturas que variam entre 400 e 570 °C. Esse processo resulta na formação de camadas superficiais com propriedades distintas daquelas encontradas no interior do material, Shetty et al. (2008).

O sucesso do processo de nitretação em alumínio e suas ligas requer atenção especial à eliminação da película superficial de óxido de alumínio (Al_2O_3), que se desenvolve em decorrência da elevada afinidade química entre o alumínio e o oxigênio. Esta película de Al_2O_3 constitui um dos obstáculos fundamentais na formação da camada de AlN, visto que atua como uma barreira para difusão, obstruindo o acesso dos átomos de nitrogênio atinjam a superfície do substrato de alumínio, Gredelj (2001); Shim (2000) e Stock (1997). Ao empregar o processo de nitretação a plasma na liga de alumínio 7075-T6, ASL et al. (2022) observou, que após ser submetida ao processo de nitretação, as propriedades de têmpera T6 da liga de Al 7075 desapareceram, portanto, ocorreu uma diminuição na dureza do substrato. Entretanto, os valores de dureza na zona de difusão são maiores do que o substrato.

Do ponto de vista comercial, a aplicação da nitretação em alumínio e suas ligas é bastante promissora. No entanto, esse processo exige atenção especial devido à presença de uma fina camada de óxido de alumínio (Al_2O_3) que naturalmente se forma na superfície do material e atua como barreira, impedindo a difusão do nitrogênio para o interior do substrato. Para viabilizar a nitretação, é essencial realizar um pré-tratamento denominado *sputtering* (pulverização catódica), que remove essa camada de óxido pouco antes da aplicação do processo. Além disso, é necessário manter uma pressão base baixa durante a operação, Moradshahi et al. (2006). A Figura 10 ilustra as interações na superfície do sólido submetido às descargas luminosas demonstrando os principais mecanismos que ocorrem durante o processo de nitretação a plasma.

Figura 10 - Processo de nitretação a plasma



Fonte: Pye, D. (2003)

2.4 ANODIZAÇÃO DURA

Segundo Araujo et al. (2021), o processo de anodização caracteriza-se pelo espessamento da camada natural de óxido do alumínio Al_2O_3 , tendo como resultado, uma camada superficial protetora altamente impermeável. As características da CA (camada anodizada), como a espessura da camada barreira e diâmetro dos poros na camada porosa, são consequências da tensão (V) empregada durante o processo. Devido relevantes resultados obtidos, a CA obtida no processo de anodização tornou-se um sinônimo de proteção contra corrosão, durabilidade e decoração .

O processo de anodização objetiva desenvolver um revestimento de óxido de alumínio homogêneo com espessura controlada sobre a superfície metálica, mediante o emprego de banhos eletrolíticos mantidos sob condições reguladas de agitação e temperatura. Para que se obtenha uma película anódica com qualidade adequada aos padrões exigidos para produtos de consumo, é necessário que o alumínio e suas respectivas ligas apresentem propriedades apropriadas para a obtenção da camada anódica, ABNT (2005).

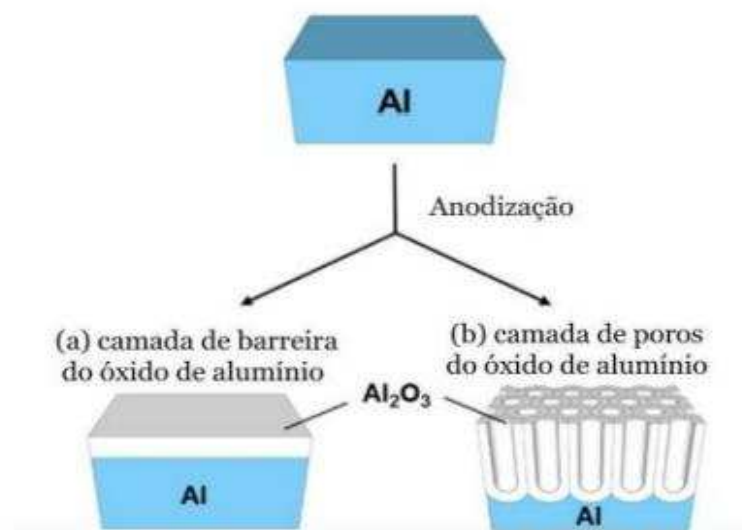
Para Regone (2004), pode-se definir a anodização, como um processo de conversão da superfície do alumínio e suas ligas em óxido de alumínio.

Industrialmente, o processo de anodização, é utilizado para obtenção de melhorias do material como:

- Aumentar a resistência à abrasão (anodização dura).
- Aumentar a resistência à corrosão.
- Melhorar a aparência decorativa.
- Melhorar a aderência à pintura.

O procedimento de anodização possibilita no alumínio a formação de duas subcamadas de óxido, intituladas de camada barreira e camada porosa. A temperatura é o fator que controla a formação de ambas as camadas, porém na camada de barreira, a diferença de tensão empregada atua diretamente. Já a densidade de corrente e tempo, por outro lado, determinam a espessura da camada porosa. A Figura 11 ilustra dois tipos de óxidos obtidos no processo de anodização.

Figura 11 - Ilustra os dois tipos de óxidos obtidos no processo de anodização do alumínio: tipo barreira (a) e tipo poroso (b)

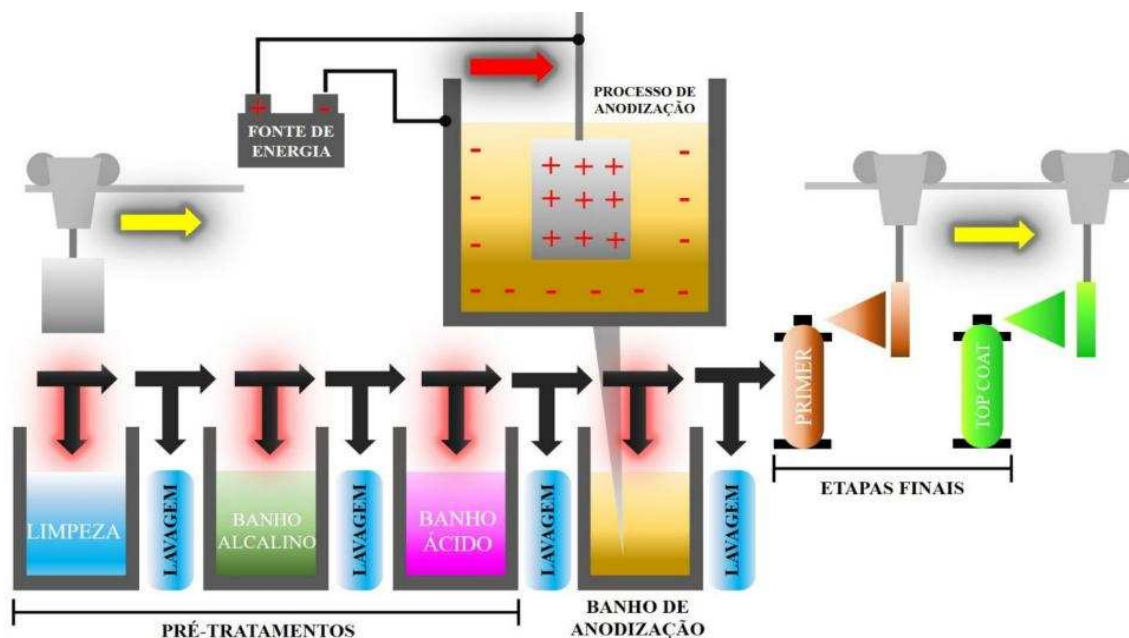


Fonte: Pinheiro (2019)

Uma linha de anodização industrial, representada na Figura 12, é composta por etapas que antecedem e sucedem o processo de anodização do alumínio e suas ligas. As fases de pré-tratamento são essenciais para a remoção de impurezas e resíduos oleosos presentes nas ligas metálicas, assegurando a adequada preparação da superfície. Já as etapas finais têm a função de garantir a proteção das peças

anodizadas, completando o tratamento com a estabilização e preservação da camada formada.

Figura 12 - Ilustração esquemática do processo de anodização industrial



Fonte: Araujo et al. (2021)

2.5 NÍQUEL DURO QUÍMICO

Atualmente, o processo para revestimento de níquel é comumente utilizado para uma variedade de aplicações industriais. Em geral, a deposição de níquel pode melhorar uma ampla gama de propriedades, previne a corrosão, melhora a dureza superficial, aumenta a resistência ao desgaste e confere um aspecto estético aos produtos, Mazur (2018).

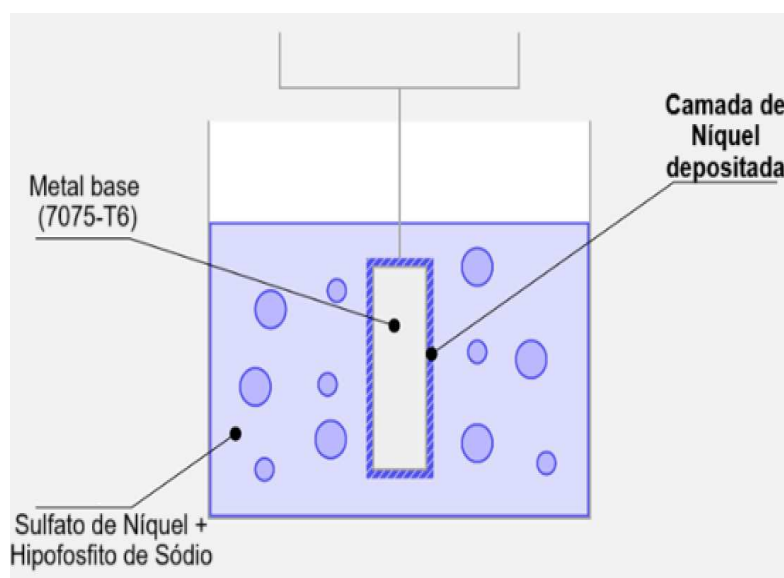
Para Karthik et al. (2023), em comparação com a liga Al7075, os compósitos com 7% em peso e 8 μ m de revestimento de níquel envelhecidos a 120 °C apresentaram uma melhoria de 108% na dureza, e os compósitos com 7% em peso e 10 μ m de revestimento de níquel envelhecidos a 120 °C apresentaram uma melhoria de 110% na dureza.

Kumar et al. (2014) realizaram uma pesquisa sobre revestimentos de níquel auto catalítico em ligas. As vantagens incluem revestimento uniforme e a possibilidade de revestimento de materiais não condutores. Alta dureza, boa resistência ao desgaste e

à corrosão tornam os materiais revestidos com níquel adequados para aplicações tribológicas nas indústrias aeroespacial, marítima, automobilística, elétrica e química.

Segundo Protolabs (2025), no processo para deposição de níquel em liga de alumínio 7075-T6, primeiramente as peças são lavadas e desengorduradas para remover quaisquer contaminantes. Após a limpeza, o substrato é ativado com um ácido, para remover óxidos e ativar a superfície. As peças são então mergulhadas na solução química de galvanoplastia, depositando a liga de níquel-fósforo nas peças até atingir a espessura desejada. Segue demonstrado na Figura 13 o processo para revestimento do substrato 7075-T6 com níquel duro químico.

Figura 13 - Processo para revestimento de níquel duro químico



Fonte: Adaptado Protolabs (2025)

Conforme Super Finishing (2025), a deposição autocatalítica de níquel-fósforo, denominada também como processo *electroless* ou método *Canning*, constitui um procedimento no qual o níquel é depositado mediante redução química utilizando compostos de fósforo. Durante este processo, o fósforo atua como metalóide que se deposita simultaneamente com o níquel, conferindo propriedades particulares ao revestimento resultante. Os revestimentos de níquel-fósforo obtidos através de redução química apresentam estrutura amorfa, característica que proporciona uma superfície livre de porosidades, constituindo uma barreira altamente eficaz contra processos corrosivos, além de apresentar elevada dureza superficial. Ligas Ni-P contendo entre 8 e 12% de fósforo em sua composição alcançam dureza na faixa de

500 a 550 HV, correspondente a 48 a 50 RC, proporcionando proteção contra corrosão e desgaste abrasivo duas vezes superior àquela oferecida pelo níquel obtido por eletrodeposição.

Os revestimentos de níquel obtidos na ausência de corrente elétrica são formados através da redução química controlada de íons níquel sobre superfícies cataliticamente ativas. Devido à natureza autocatalítica do processo, a reação de deposição prossegue continuamente enquanto a superfície permanecer imersa na solução de níquel químico. A ausência de corrente elétrica durante a deposição elimina os efeitos de polarização e irregularidades na espessura da camada, particularmente nas extremidades das peças, fenômenos característicos dos processos eletrolíticos convencionais, Super Finishing (2025).

2.6 DESGASTE E ABRASÃO

A tribologia é a área da ciência dedicada ao estudo das interações entre superfícies em movimento relativo, abrangendo temas como atrito, desgaste e lubrificação. Essa disciplina envolve a análise dos aspectos físicos e químicos das interações entre componentes, distribuição de forças, conversão de energia e modificações na topografia superficial, Bhushan (2002).

O fenômeno do desgaste pode ser conceituado como a deterioração de superfícies sólidas que implica na perda contínua de massa, decorrente do movimento relativo estabelecido entre a superfície em questão e o contato com outros materiais ASTM G77 (1991).

O desgaste é uma das principais causas de falhas em componentes mecânicos, resultando na perda de propriedades mecânicas e em descarte prematuro. Reduzir o desgaste representa um benefício direto nos custos de manutenção e também na eficiência energética, uma vez que o desgaste está associado à dissipação de energia. A lubrificação, por sua vez, é uma estratégia eficaz para minimizar o atrito e controlar o desgaste, Stachowiak (2001).

Segundo Azevedo (2019), existem diversos mecanismos de desgaste, entre eles: adesivo, abrasivo, corrosivo, erosivo, por cavitação, por fadiga e *fretting*. Dentre esses, o desgaste abrasivo é o mais comum no ambiente industrial, representando mais de 50% dos casos registrados. Esse mecanismo de desgaste é caracterizado

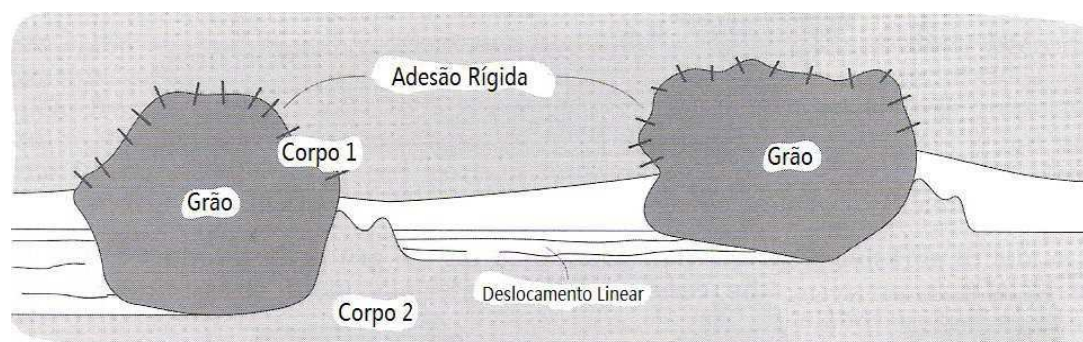
pela movimentação ou deformação do material de uma superfície sólida, provocada por partículas duras ou saliências que deslizam sobre ela.

O desgaste abrasivo ocorre devido à ação de partículas duras que podem estar aderidas a uma das superfícies ou presentes entre duas superfícies em movimento relativo. A intensidade desse desgaste está diretamente relacionada a fatores como o tamanho, a dureza, a pressão de contato e a velocidade das partículas envolvidas, Bayer (2004).

As ligas de alumínio estão sujeitas não apenas ao desgaste abrasivo, mas também ao desgaste por corrosão. Os mecanismos mais frequentes de deterioração corrosiva incluem: reações galvânicas entre a matriz metálica e os elementos de liga, desenvolvimento de fases terciárias nas interfaces dos constituintes, e imperfeições interfaciais resultantes do processo de cristalização do material. O tratamento de anodização constitui a técnica mais amplamente empregada para conferir proteção anticorrosiva às superfícies dessas ligas de alumínio. Contudo, quando grãos pontiagudos dos elementos de liga emergem na superfície, ocorre a formação de cavidades no revestimento anodizado, originando regiões de maior vulnerabilidade à corrosão (He, 2011).

A Figura 14 ilustra o principal tipo de desgaste abrasivo: o de dois corpos, onde a partícula abrasiva está aderida em uma das superfícies, e o de três corpos, no qual a partícula está solta entre as superfícies em atrito.

Figura 14 - Desgaste abrasivo de dois corpos



Fonte: Stachowiak (2001)

Sabe-se que os polímeros podem provocar abrasão nos moldes em razão do contato constante e das propriedades intrínsecas de seus materiais. Durante os processos de moldagem, o atrito entre o polímero e as superfícies do molde pode

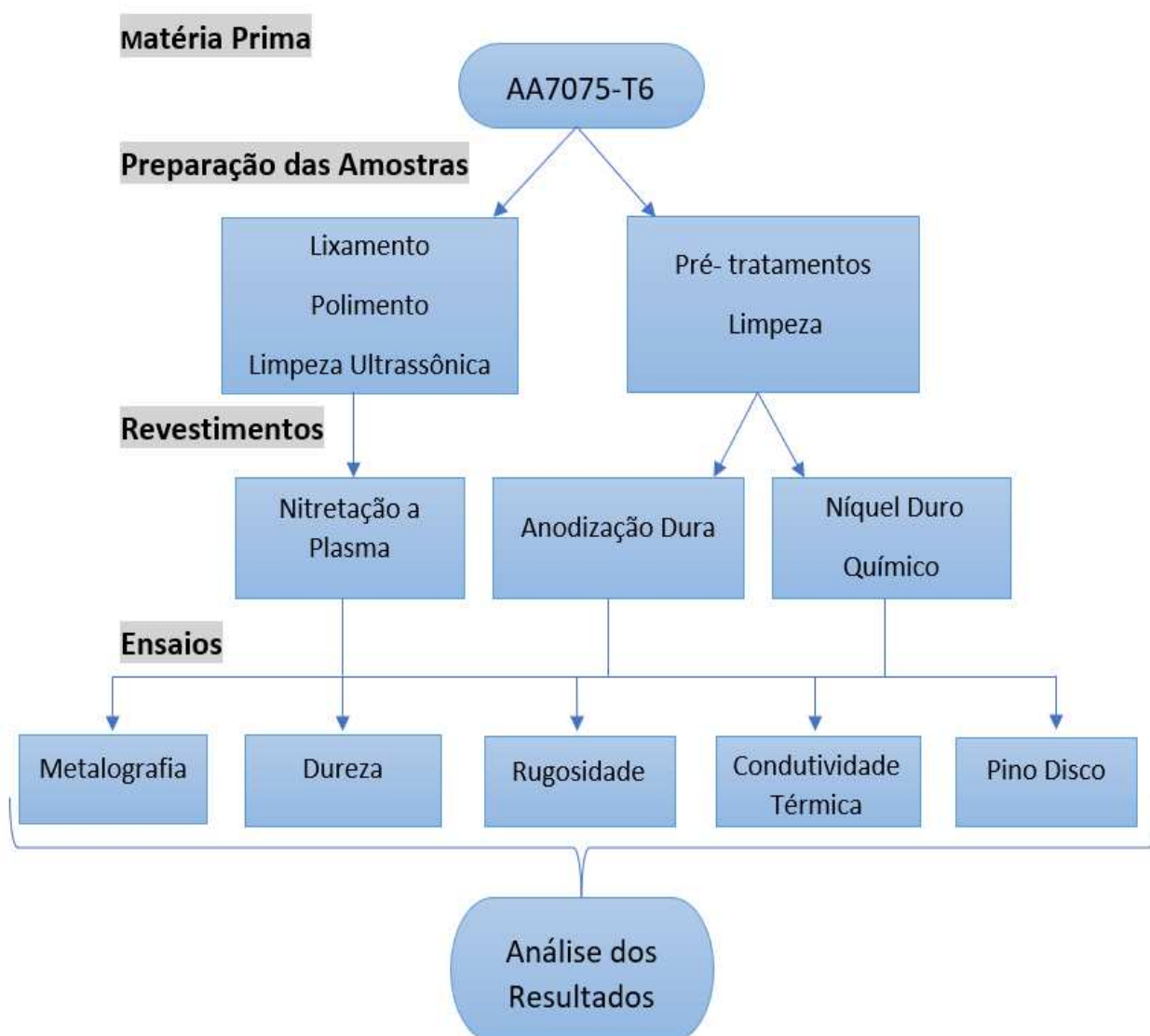
fazer com que partículas presentes no próprio polímero atuem como abrasivos. Além disso, impurezas ou partículas sólidas incorporadas ao material polimérico podem, sob pressão, causar riscos e desgaste na superfície do molde.

Esse tipo de abrasão também pode ser intensificado pelos movimentos repetitivos do ciclo de produção, contribuindo para a degradação progressiva do molde ao longo do tempo. Como forma de mitigar esses efeitos, é prática comum a aplicação de revestimentos protetores nas superfícies dos moldes ou a seleção de polímeros com menor potencial abrasivo.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo estão apresentados os procedimentos utilizados na realização da parte experimental desta dissertação. Na sequência estão descritos detalhamentos sobre a matéria prima, preparação das amostras, a técnica de nitretação a plasma empregada e os ensaios realizados para caracterização da superfície obtida. A Figura 15 ilustra o fluxograma de atividades desenvolvidas durante a presente análise.

Figura 15 - Fluxograma demonstrando a sequência de atividades desenvolvidas durante o presente trabalho



Fonte: Autoria própria (2025)

3.1 MATÉRIA PRIMA

A composição química da liga 7075-T6 utilizada, foi analisada por espectrometria, o equipamento utilizado foi um espectrômetro SHIMADZUOES-500I, obtendo a composição comparada ao padrão do material estipulado por norma. A Tabela 7 demonstra, os elementos constituintes, juntamente com as faixas de composição estabelecidas na norma B209/209M - 21.

Tabela 7 - Composição química da liga de alumínio 7075 tratável termicamente

Elementos	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Outros	
									cada	total
B209/209M	0,40	0,50	1,2- 2,0	0,30	2,1- 2,9	0,18- 0,28	5,1- 6,1	0,20	0,05	0,15
Nota	O teor de alumínio é determinado pela diferença entre 100,00% e a soma dos demais elementos metálicos presentes em quantidades iguais ou superiores a 0,010%, sendo que cada valor deve ser previamente arredondado para a segunda casa decimal antes da realização da soma.									

Fontes: Adaptado ASTM B209/209M (2021)

A matéria prima utilizada nesse trabalho é a liga de alumínio 7075-T6, fornecida na forma de barra medindo aproximadamente 84X38X100mm. A barra foi inicialmente cortada em 4 partes, posteriormente realizou-se um processo de melhoria do acabamento superficial através do processo de frezamento, resultado em amostras medindo 84X34X13mm. Posteriormente 2 amostras foram fracionadas em 6 partes menores, 3 amostras nitretadas a plasma e 3 amostras do material base 7075-T6 (sem tratamento superficial), medindo aproximadamente 23X38X13mm, para realização dos tratamentos superficiais propostos. As amostras submetidas aos processos de revestidas de níquel duro químico e amostras anodizadas, foram fracionadas em 3 partes menores, após serem submetidas aos seus respectivos tratamentos superficiais, medindo aproximadamente 23X38X13mm.

3.2 TRATAMENTO SUPERFICIAL DE NITRETAÇÃO A PLASMA

O processo de nitretação a plasma foi realizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos e Metalúrgicos (LABEMM), pertencente ao Departamento de Mecânica do

Instituto Federal Catarinense campus Luzerna. Foram utilizadas amostras da liga de alumínio 7075-T6, como material base para o processo de nitretação a plasma.

Após um processo de fracionamento das amostras, visando a realização dos revestimentos e ensaios propostos, iniciou-se o processo de lixamento progressivo das amostras. Foram utilizadas lixas de carbetto de silício de diferentes granulações, na seguinte sequência: 220, 400, 600, 800, 1200. O polimento foi realizado em todas as superfícies das peças, com pasta diamantada de 3 micrômetro e 1 micrômetro sequencialmente. Para finalizar a preparação as amostras passaram por um processo de limpeza por ultrassom, utilizando um equipamento Metasom -14, em dois ciclos de 10 minutos. No primeiro ciclo as amostras foram submersas em álcool etílico e no segundo ciclo as amostras foram submersas em acetona.

Inicialmente realizou-se vácuo na câmara de nitretação até atingir a pressão de 1.40 mbar e assim se manteve por aproximadamente 10 min. Após o aquecimento, iniciou-se o pré-tratamento denominado *sputtering* (pulverização catódica) durante 30 minutos, para limpeza física superficial das amostras, e para atingir a temperatura desejada da condição de nitretação empregada. Um constante fluxo de gás nitrogênio (N) e argônio (Ar) como gás inerte, com vazão de saída de 0,05NI/mm, manteve-se constante o fluxo e proporção de Ar e N₂ a temperatura de 300 °C. Esse processo é essencial para a eficácia do processo de nitretação devido a ionização do gás inerte resultar em uma superfície metálica limpa, isenta de contaminações atômicas, o que é essencial para a eficácia do processo de nitretação. Após o tempo necessário para a remoção completa da camada de óxido superficial, iniciou-se então a etapa de nitretação a plasma propriamente dito, fechou-se o fluxo de argônio e foi aberta a válvula do hidrogênio (H).

O processo de nitretação foi executado de modo a manter constante o fluxo dos gases N₂ (80%) e H₂ (20%). Durante todo o processo de nitretação a câmara foi mantida a uma temperatura constante de 450°C e pressão média 3,0 mbar por 3 horas. Após a finalização do processo de nitretação as amostras foram resfriadas à vácuo em fluxo de gás nitrogênio. Na Tabela 8 estão apresentados os principais parâmetros e suas variações apresentadas durante o processo de nitretação a plasma das amostras de alumínio 7075-T6.

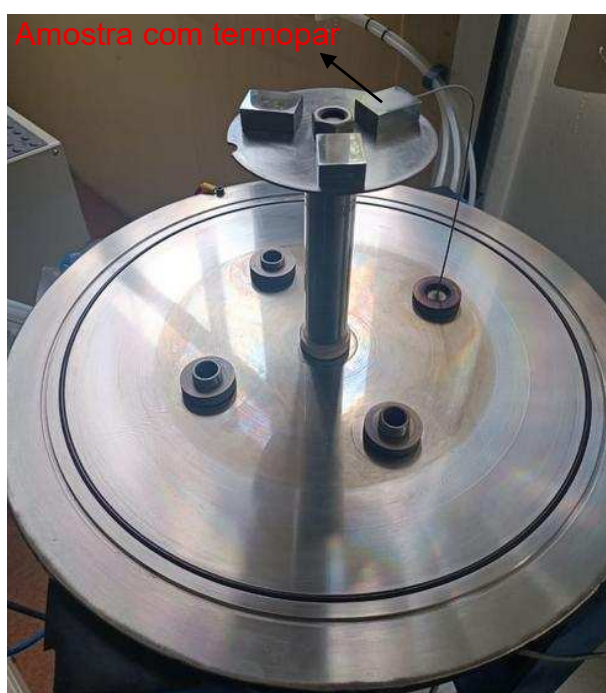
Tabela 8 - Parâmetros utilizados na nitretação a plasma

Atmosfera	Pressão	Corrente	Tensão	Temperatura	Tempo
0,2 NI/min - N ₂	3,0mbar	450 ± 38mA	240 ± 7V	450 ± 5°C	3h
0,05NI/min - H ₂					

Fonte: Aatoria Própria (2025)

Após a finalização do processo de nitretação as amostras foram resfriadas à vácuo em fluxo de gás nitrogênio. Na Figura 16 (a), (b), (c) e (d) estão ilustradas algumas etapas do processo e equipamentos utilizados para realização da nitretação das amostras da liga de alumínio 7075-T6.

Figura 16 - (a) amostras dispostas para nitretação, (b) Câmara e equipamentos utilizados para nitretação, (c) amostras em nitretação e (d) amostras após o processo de nitretação.



(a)



(b)



(c)

(d)

Fonte: Autoria Própria (2025)

3.3 TRATAMENTO SUPERFICIAL DE ANODIZAÇÃO DURA

O processo de anodização dura da liga de alumínio 7075-T6, foi realizado através da empresa Super Finishing. Para Super Finishing (2025), o tratamento T6 (que compreende solubilização seguida de envelhecimento artificial) promove incremento nas propriedades mecânicas, porém simultaneamente eleva a susceptibilidade à corrosão intergranular pós-anodização quando há deficiências no controle do processo. A liga 7075-T6 apresenta elevado teor de zinco e cobre, constituintes que podem comprometer a homogeneidade e a qualidade do revestimento anódico. A camada anodizada resultante pode exibir menor uniformidade e maior predisposição à formação de microfissuras em comparação com ligas de composição menos complexa.

A especificação militar MIL-PRF-8625 define três tipos principais de anodização:

Tipo I: Ácido crômico

Tipo II: Ácido sulfúrico (anodização padrão)

Tipo III: Ácido sulfúrico com alta densidade de corrente e baixa temperatura (anodização dura)

A anodização dura, também denominada anodização tipo III, constitui um procedimento eletroquímico extensivamente empregado para aprimorar as propriedades de resistência à corrosão, desgaste e abrasão em ligas de alumínio, incluindo a liga 7075-T6. Este processo promove a formação de uma película de óxido de alumínio (Al_2O_3) com maior espessura e dureza sobre a superfície do componente mediante eletrólise. A camada resultante apresenta características isolantes, estrutura porosa, natureza cerâmica e elevada resistência ao desgaste. Seguem demonstradas na Tabela 9 as principais etapas, reagentes e parâmetros utilizados para realização do processo de anodização dura em liga de alumínio 7075-T6.

Tabela 9 – Processo de anodização dura em liga de alumínio 7075-T6

Desengraxe	Decapagem	Neutralização	Anodização	Selagem (opcional)
NaOH 5% ou solução alcalina comercial	NaOH 10%	HNO_3 10% solução diluída de ácido crômico	H_2SO_4 15-20% (ácido sulfúrico técnico)	Selagem em água quente
Temperatura: 40-60 °C	Temperatura: ambiente	Temperatura: 20-40 °C	Temperatura do banho -5 °C a +5 °C (quanto mais fria, melhor a dureza)	Imersão em água desionizada a 96-98 °C
Tempo: 5 a 10 minutos	Tempo: 30 a 60 segundos	Tempo: 1 a 3 minutos	Tempo: 30 a 90 minutos (dependendo da espessura)	Tempo: 20 a 30 minutos

Fonte: Adaptado Super Finishing (2025)

Como características a camada de Al_2O_3 formada pelo processo de anodização dura, pode gerar um revestimento com espessura de 25 a 50 μm . Já a dureza comumente obtida pode variar entre 400 a 600 HV, podendo atingir até 1000 HV em casos ideais. Quanto maior a espessura da camada, maior a resistência ao desgaste, porém maior a fragilidade (microfissuras), Super Finishing (2025).

3.4 TRATAMENTO SUPERFICIAL COM NÍQUEL DURO QUÍMICO

O processo para revestimento de Níquel duro químico da liga de alumínio 7075-T6, foi realizado através da empresa Super Finishing. O níquel pode ser depositado sobre o alumínio por diferentes processos de revestimento, com objetivos variados (proteção contra corrosão, melhoria da dureza, condutividade elétrica, aderência etc.). Os principais processos de revestimento de níquel em amostras de alumínio são a deposição eletrolítica (galvânica) de níquel, deposição química (níquel químico ou *electroless nickel plating*), pulverização térmica (*thermal spray*) de níquel e a Evaporação física (PVD) ou deposição química de vapor (CVD).

O processo utilizado foi a deposição química, que garante revestimento uniforme, apresenta excelente aderência e resistência à corrosão. A aplicação de revestimento com Níquel duro químico não requer corrente elétrica, retificadores ou ânodos para aplicação. Nesse processo a deposição da liga ocorre através da reação química ou autocatalítica por meio dos agentes dissolvidos em solução aquosa de Sulfato de Níquel + Hipofosfito de Sódio. A peça é submetida a solução por imersão após pré-tratamento especificado. Nesse processo todas as suas superfícies recebem o revestimento com camadas totalmente uniformes da liga de níquel-fósforo, independente da complexidade geométrica. O revestimento com Níquel Duro químico pode ser utilizado em peças metálicas, oferecendo alta dureza superficial, acabamento uniforme, resistência a abrasão e corrosão, Super Finishing (2025). A Tabela 10 descreve, com características técnicas dos banhos, o processo autocatalítico de revestimento com níquel duro.

SFB - Níquel Duroquímico Baixo Fósforo

SFM - Níquel Duroquímico Médio Fósforo

SFA - Níquel Duroquímico Alto Fósforo

SFT - Níquel Duroquímico Teflonado

SFI - Níquel Duroquímico Interdifundido

Tabela 10 – Parâmetros e características do processo autocatalítico para revestimento com níquel duro

CARACTERÍSTICA	SFB	SFM	SFA	SFT	SFI
INDICAÇÃO	SOLDABILIDADE ABRASÃO	ABRASÃO CORROSÃO	CORROSÃO ABRASÃO	LUBRICIDADE CORROSÃO	ALTA CORROSÃO
ASPECTO VISUAL	SEMI BRILHANTE	BRILHANTE	SEMI BRILHANTE	ACETINADO	ESVERDEADO
TEOR FÓSFORO (% PESO)	1 a 3	7 a 9	10 a 12	9 a 11	10 a 12
DUREZA COMO DEPOSITADO (VICKERS HV)	700	550	500	300 a 350	500
DUREZA APÓS Trat. Térmico (VICKERS HV)	1.000	950	950	400 a 450	700
RESISTÊNCIA À CORROSÃO	REGULAR	BOA	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE
HORAS SALT SPRAY	96	96	1.000	500 a 1.000	+1.000
PROPRIEDADE MAGNÉTICA C/ DEPOSITADO	MAGNÉTICO	LIGEIRAMENTE MAGNÉTICO	NÃO MAGNÉTICO	NÃO MAGNÉTICO	NÃO MAGNÉTICO
RESISTIVIDADE ELÉTRICA	ÓTIMA	BOA	BOA	BOA	BOA
PONTO FUSÃO	1.400°C	890°C	890°C	Ni - 890°C PTFE - 325°C	890°C

Fonte : Adaptado Super Finishing (2025)

3.5 METALOGRAFIA

Foram realizados 3 embutimentos com amostras submetidas ao processo de nitretação a plasma e não foi observada a presença de camada branca em nenhuma das amostras nitretadas submetidas ao ensaio metalográfico. Foram realizadas análises por meio de microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo JCM-7000 acoplado a um sistema de EDS, pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica da UDESC/CCT. Para análise da microestrutura do substrato, determinação da espessura da camada anodizada e de níquel duro químico, utilizou-se um microscópio óptico (MO), modelo Optika B1000, pertencente ao laboratório LABEMM do Instituto Federal Catarinense. Com a finalidade de realizar as análises e medições desejadas, as amostras após o embutimento, foram lixadas com lixas de carbo de

silício na seguinte sequência de granulação: 220, 400, 600, 800, 1200. Posteriormente foram polidas com pasta diamantada de 3 micrômetro e 1 micrômetro sequencialmente, após realizou-se ataque químico com o reagente Keller. A microestrutura de cada condição foi revelada mediante ataque químico utilizando o reagente Keller, constituído por uma solução contendo 10 ml de ácido fluorídrico, 15 ml de ácido clorídrico concentrado, 25 ml de ácido nítrico concentrado e 50 ml de água destilada, aplicado durante 15 a 30 segundos. A análise microestrutural foi posteriormente conduzida através das técnicas de microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

3.6 DUREZA

A resistência de um material a uma deformação plástica localizada é medida através do ensaio de dureza. Ela pode avaliar aspectos como: a resistência ao desgaste, o grau de endurecimento de superfícies submetidas a tratamento térmico e estimar a resistência mecânica em geral do material, quando superficialmente as características mecânicas são iguais de todo o corpo do material, Callister (2002) e Ettore (1997). A realização da medição das camadas superficiais, das amostras objetos de estudo, foram baseadas na norma ASTM E384-22 para ensaios de dureza Vickers, sendo realizadas no LABEMM com um microdurômetro EQUILAMEQMHV2000Z.

3.7 RUGOSIDADE

A rugosidade foi descrita por Rosa (2007), como um conjunto de irregularidades, reentrâncias nas superfícies, que admitem ser analisadas através de equipamentos como o rugosímetro. As análises da rugosidade superficial, também apresentam grande relevância, pois influenciam no comportamento dos componentes mecânicos, tais como: resistência ao desgaste, resistência que a superfície oferece ao escoamento de fluidos, capacidade de deslizamento, entre outros.

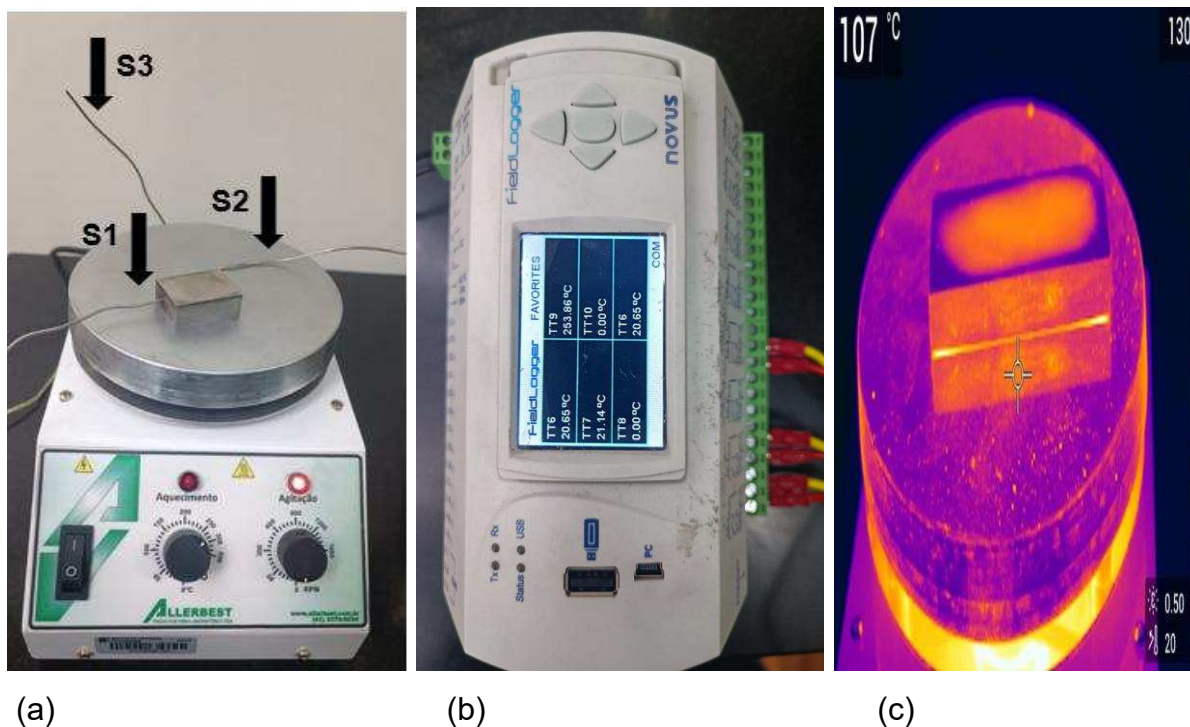
Segundo Almeida e Souza (2015), a rugosidade na superfície de um molde será transferida para o produto final, assim seu conhecimento e avaliação, são altamente relevantes. Em aplicações onde o acabamento superficial seja um fator fundamental,

um baixo nível de rugosidade e um efetivo controle são fundamentais para obtenção do acabamento desejado. Para mensurar a rugosidade superficial da liga 7075-T6 e dos diferentes revestimentos superficiais aplicados para realização do estudo, utilizou-se um rugosímetro modelo TR200. Os parâmetros avaliados foram a rugosidade Ra que representa a média aritmética dos picos e vales presentes na superfície, a rugosidade Rz que é a média das cinco maiores distâncias entre os picos mais altos e os vales mais baixos em um comprimento de amostragem e a rugosidade Rt é a profundidade total da rugosidade, definida como a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo em uma área de avaliação.

3.8 CONDUÇÃO TÉRMICA

Sendo a alta condutividade térmica do alumínio a principal característica que norteia este estudo, buscou-se comparar as amostras da liga 7075-T6 com as amostras nitretadas, anodizadas e revestidas de níquel duro químico. Com a finalidade de observar se os revestimentos aplicados, exerceriam alguma influência relevante na condutividade térmica do material estudado. Para monitoramento da condução térmica ao longo do tempo, as amostras foram submetidas a temperatura de 250°C, através de contato com a superfície de aquecimento do agitador magnético com aquecimento, demonstrado na Figura 17 (a). Para monitoramento da temperatura utilizou-se 3 sensores, sendo o primeiro para monitoramento da temperatura interna da amostra através de um orifício com diâmetro de 1mm por 15mm de profundidade, um segundo para monitorar a temperatura da superfície de aquecimento no agitador magnético e um terceiro utilizado para o monitoramento da temperatura ambiente durante a realização dos testes (respectivamente denominados S1, S2 e S3). Os 3 sensores utilizados estavam conectados a um registrador de dados industrial da marca FieldLogger, Figura 17 (b). Uma câmera térmica foi utilizada em adição aos sensores para um monitoramento preciso e contínuo da temperatura, assim como demonstrado na Figura 17 (c).

Figura 17 - Monitoramento da condutividade térmica das amostras (a), registrador de dados (b) e imagem de câmera térmica (c)



Fonte: Autoria própria (2025)

3.9 ENSAIO DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO SOBRE DISCO

Um dos grandes problemas enfrentado pela indústria de moldes é o desgaste, que ocorrem em moldes para injeção de polímeros, onde as superfícies mais frequentemente danificadas nos moldes são os canais de injeção, canal de alimentação e as superfícies de fechamento das placas cavidade. A aparência da cavidade é afetada com aumento da rugosidade, resultando na necessidade periódica de polimento. A realização de diversos polimentos nas cavidades, pode resultar em falhas por exceder as tolerâncias indicadas no projeto. Após milhares de ciclos de produção, devido ao desgaste das cavidades, os moldes podem apresentar não conformidades, resultando em rebarbas no produto. As falhas por desgaste ocorrem principalmente, porque o material polimérico fundido flui sobre a superfície do molde, causando grande atrito, degradando a superfície do molde e resultando no aumento na rugosidade, He (2011) e Bergstrom et al. (2001).

Os materiais submetidos ao desgaste por deslizamento, mediante o emprego de um equipamento do tipo pino-disco, são avaliados através de um método de ensaio que compreende um procedimento laboratorial destinado à avaliação do desgaste. Esta metodologia normatizada emprega um conjunto definido de parâmetros experimentais (força aplicada, velocidade de deslizamento, características dos materiais, entre outros). Adicionalmente, é possível determinar o coeficiente de atrito através deste procedimento, ASTM G99 (2005). A Figura 18 demonstra um tribômetro pino disco, no qual um pino de ponta esférica fixo, através de uma carga aplicada sobre a superfície do corpo de prova. O tribômetro utilizado para os ensaios pertence ao Departamento de Engenharia Mecânica da UDESC/CCT.

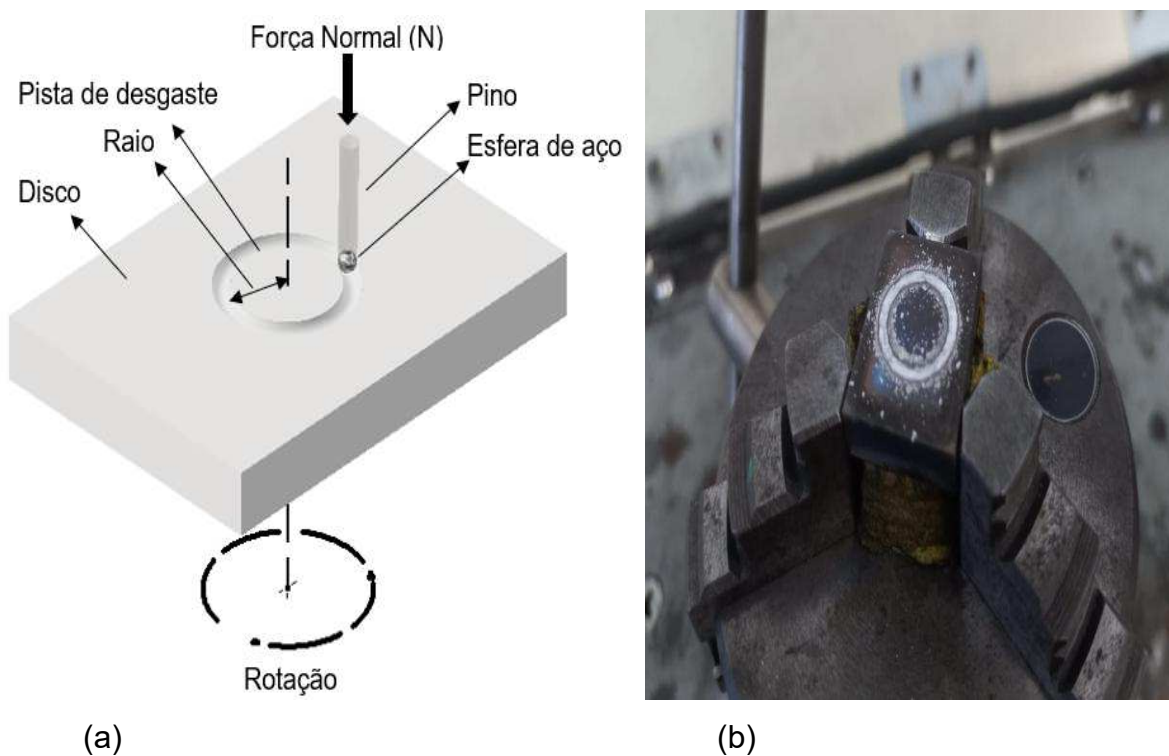
Figura 18 - Equipamento utilizado no ensaio (a) e Impressão na amostra da pista de desgaste após realização do ensaio (b)



Fonte: Autoria própria (2025)

Com o movimento de rotação, o atrito gerado entre o pino e a superfície do corpo de prova, resulta na formação da pista de desgaste, conforme norma ASTM G99, demonstrado na Figura 19 (a) e (b).

Figura 19 – Ilustração adaptada do ensaio de pino disco baseado na ASTM G99 (a) e amostra após ensaio de pino disco (b).



Fonte: Autoria própria (2025)

A medição do volume de material removido pelo ensaio de pino sobre disco foi realizada com um perfilômetro Mitutoyo modelo CV-2100, pertencente à UDESC/CCT, demonstrado na Figura 20.

Figura 20 - Perfilômetro de coluna modelo CV-2100



Fonte: Autoria própria (2025)

A perfilometria óptica utiliza luz para mapeamento de forma, textura, rugosidade e para medições. São empregadas tecnologias como interferometria de luz branca, variação de foco e microscopia confocal para capturar detalhes topográficos com alta precisão. Para uma avaliação da topografia das amostras e análise tridimensional da pista de desgaste, utilizou-se o perfilômetro óptico modelo ZeGage™ Pro HR 3D, pertencente à UFSC. A Figuras 21 demonstra o perfilômetro óptico 3D em funcionamento.

Figura 21 – Perfilômetro óptico 3D



Fonte: Autoria própria (2025)

A aquisição dos dados de força de atrito para realização dos cálculos para obtenção do coeficiente de atrito μ , foi realizada durante os ensaios de pino disco, sendo:

$$\mu = \frac{F}{W}$$

Onde F é a força de atrito (força lateral) e W representa a força normal (carga aplicada). Através do valor da área, o volume desgastado pode ser obtido pela equação representada abaixo:

$$V = 2\pi rA$$

Sendo V o volume desgastado (removido da amostra), r representa o raio da pista de desgaste e A é a área média transversal do perfil de desgaste do disco. Na Tabela 11 estão demonstrados os parâmetros utilizados para a realização do ensaio de pino disco.

Tabela 11 - Parâmetros dos ensaios de Pino disco

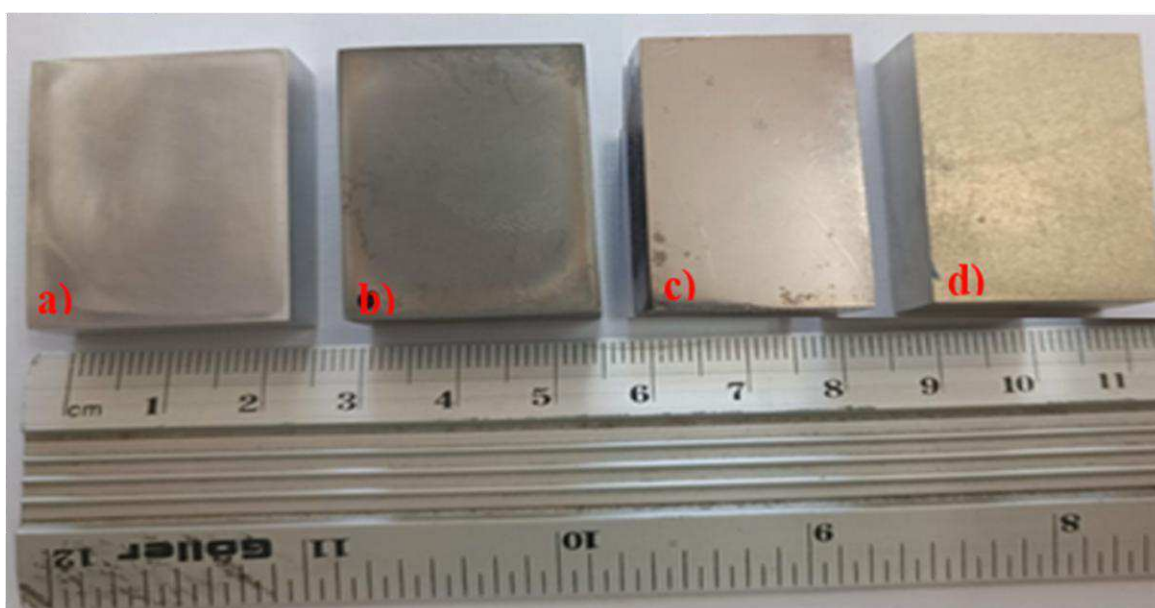
Amostras	Rev. Níquel / Anodização dura / Nitretação a plasma / 7075-T6
Distância (m)	100,00
Velocidade (m/s)	0,10
Raio da esfera (mm)	3,00
Diâmetro da pista (mm)	12,00
Carga do ensaio (gramas)	1000,00
Rotação (RPM)	159,15
Voltas	2653
Tempo de ensaio (horas)	0,28

Fonte: Autoria própria (2025)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são demonstrados e discutidos os resultados obtidos após os processos de nitretação a plasma, anodização dura e níquel duro químico, em amostras da liga de alumínio 7075-T6. Na Figura 22 estão apresentadas um exemplar de cada processo de tratamento superficial proposto. As amostras submetidas ao processo de nitretação apresentaram aspecto fosco e escurecido, já as amostras submetidas ao processo de revestimento com níquel duro obtiveram uma superfície lisa e brilhosa e o processo de anodização resultou em amostras douradas com baixo brilho.

Figura 22 - Amostras produzidas para o estudo 7075-T6 (a), nitretação a plasma (b) revestida de níquel (c) e anodização dura (d)



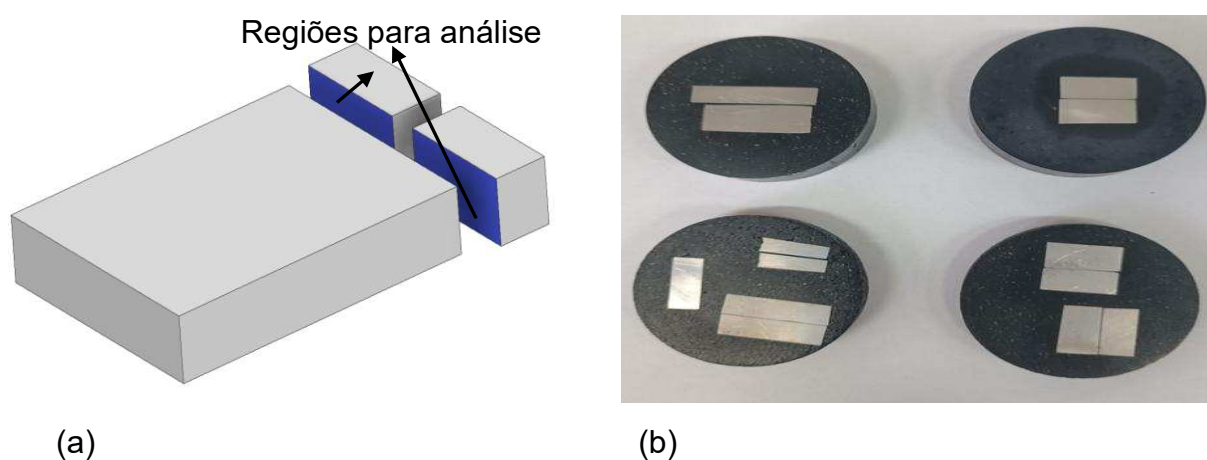
Fonte: Autoria própria (2025)

4.1 ANÁLISE MICROGRÁFICA

As amostras foram cortadas com o *cut-off* com refrigeração, conforme Figura 23 (a), visando não promover alteração na microestrutura do material e na sequência foram embutidas a quente com baquelite, Figura 23 (b). Na sequência as amostras foram lixadas com lixas de carbeto de silício na seguinte sequência de granulação: 220, 400, 600, 800, 1200. Posteriormente foram polidas com pasta diamantada de 3

micrômetro e 1 micrômetro sequencialmente, após realizou-se ataque químico com o reagente Keller por 25 segundos, para revelação da microestrutura. Com o objetivo de analisar a camada superficial depositada em cada tratamento superficial proposto no estudo, para obtenção de dados, como a espessura de camada, dureza e micrografia.

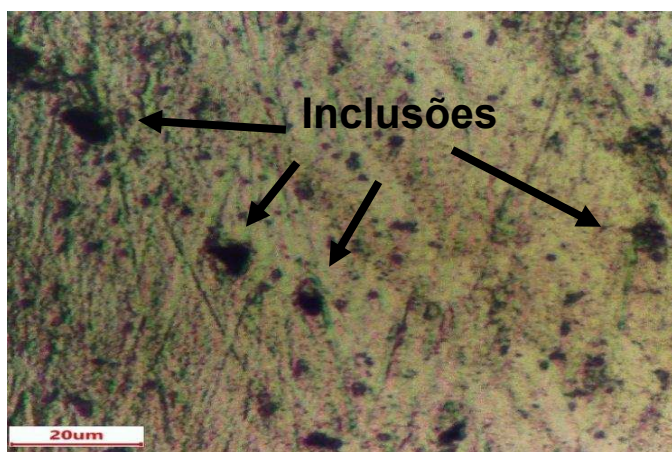
Figura 23 – Ilustração do método de corte das amostras para análise (a) e amostras embutidas em baquelite para realização de ensaios (b).



Fonte: Autoria própria (2025)

As análises metalográficas foram realizadas com o objetivo de analisar a microestrutura presente em cada processo de tratamento superficial estudado. A Figura 24 apresenta imagem obtida por microscopia óptica da liga 7075-T6, não submetida a tratamento superficial adicional.

Figura 24 - Imagem de microscopia óptica da liga 7075-T6 com aumento de 400X

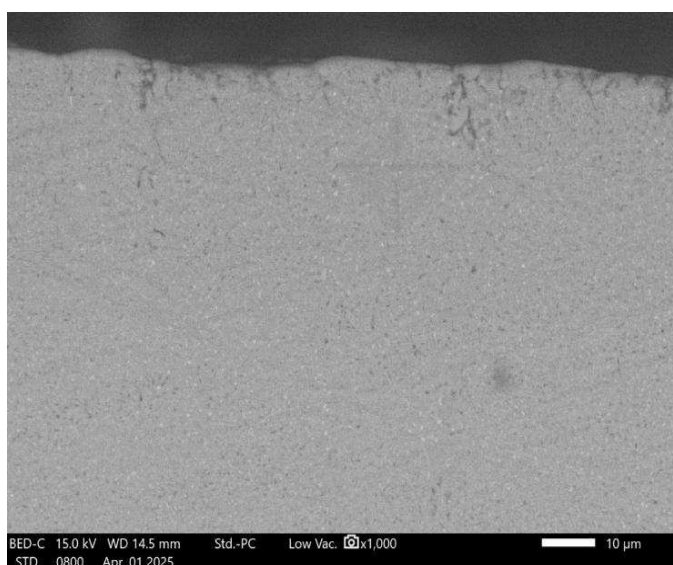


Fonte: Autoria própria (2025)

A análise microestrutural revela a ocorrência de pequenas partículas esféricas de coloração escura distribuídas na microestrutura da liga de alumínio. Conforme reportado por Birol (2011), Ellendt et al. (2010) e Guerra (2014), tais partículas correspondem a precipitados de Mg_2Si que, subsequentemente ao tratamento térmico T6, encontram-se dispersos homogeneamente na matriz metálica. Alternativamente, segundo Jacumasso (2014), essas formações podem constituir fases intermetálicas não solubilizadas, tais como Al_7Cu_2Fe .

A Figura 25 apresenta a micrografia realizada com MEV na superfície nitretada, porém, não foi possível observar a camada nitretada (chamada camada branca), assim como também havia ocorrido com as análises realizadas a partir de MO. A camada branca de nitretação a plasma em liga de alumínio pode não ser visível por alguns motivos importantes. Um desses motivos está associado a camada obtida ser extremamente fina, muitas vezes na escala de nanômetros a poucos micrômetros, o que pode estar abaixo da resolução detectável mesmo por alguns microscópios eletrônicos de varredura. Além disso, a camada nitretada em muitos casos possui uma composição e estrutura que não apresentam contraste suficiente em imagens de microscopia eletrônica, dificultando sua distinção da superfície original do alumínio. Também existe a possibilidade de a camada branca estar sendo arrancada no processo de preparação das amostras para metalografia.

Figura 25 – Imagem da superfície submetida ao processo de nitretação a plasma



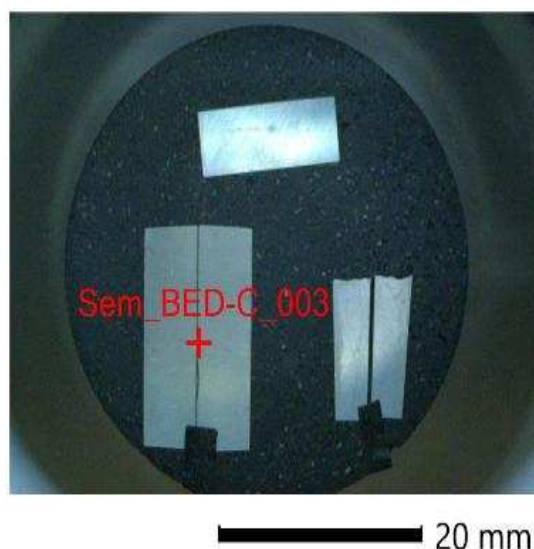
Fonte: Autoria própria (2025)

A espectroscopia de raios X de energia dispersiva (EDS) foi obtida na superfície de uma das amostras de 7075-T6, submetida ao processo de nitretação a plasma. A Figura 26 (a) apresenta a tabela de elementos na superfície da amostra e a Figura 26 (b) demonstra a amostra analisada. Devido se tratar de uma técnica semiquantitativa, esta análise foi utilizada qualitativamente para identificação e verificação da presença de nitrogênio (N) na superfície da amostra. O mapa elementar tem como objetivo identificar e visualizar a distribuição dos elementos químicos presentes na superfície ou na seção transversal da amostra nitretada. Essa análise permite verificar a presença e a difusão do nitrogênio na matriz metálica, confirmando a eficiência do processo de nitretação.

Figura 26 – Elementos na superfície da amostra nitretada (a) e amostra analisada (b)

Elemento	Linha	Massa%
C	K	27.99±0.05
N	K	2.85±0.03
O	K	20.36±0.04
Na	K	0.57±0.01
Mg	K	3.30±0.01
Al	K	37.71±0.04
Si	K	0.27±0.01
Cl	K	0.26±0.01
K	K	0.26±0.01
Ca	K	0.14±0.01
Cr	K	0.66±0.01
Fe	K	1.84±0.02
Cu	K	1.00±0.02
Zn	K	2.78±0.04
Total		100.00

(a)

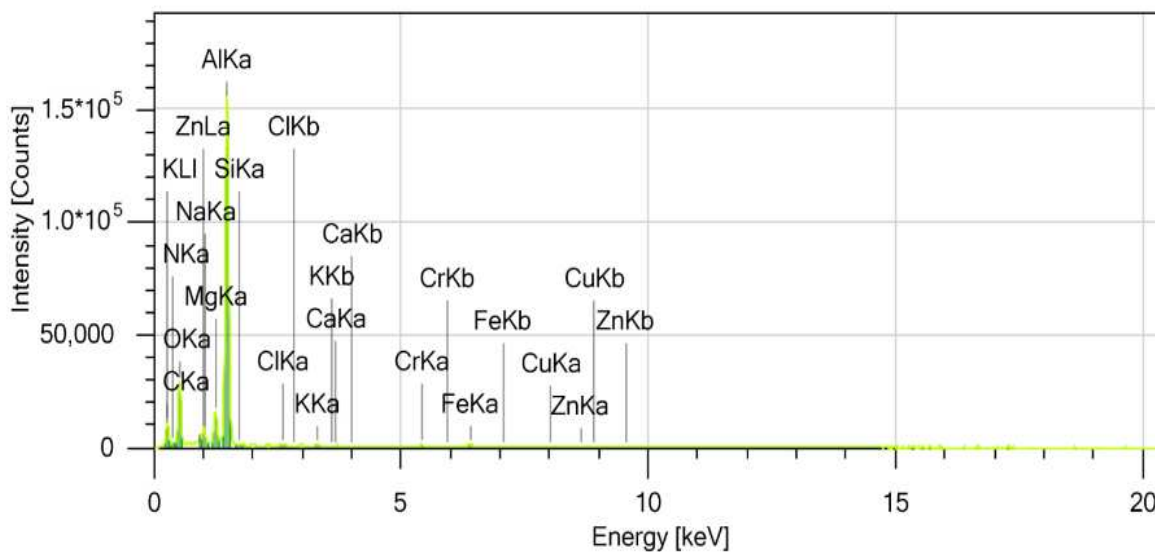


(b)

Fonte: Autoria própria (2025)

Como os picos de oxigênio (O) e nitrogênio (N) encontram-se próximo no espectro de EDS, por esse motivo assim como Camarinha (2018), Rocha (2018), ASL et al. (2022) e diversos outros pesquisadores optam por retirar o elemento “oxigênio” na análise. A Figura 27 apresenta o espectro de EDS da superfície em uma amostra de 7075-T6 submetida ao processo de nitretação a plasma.

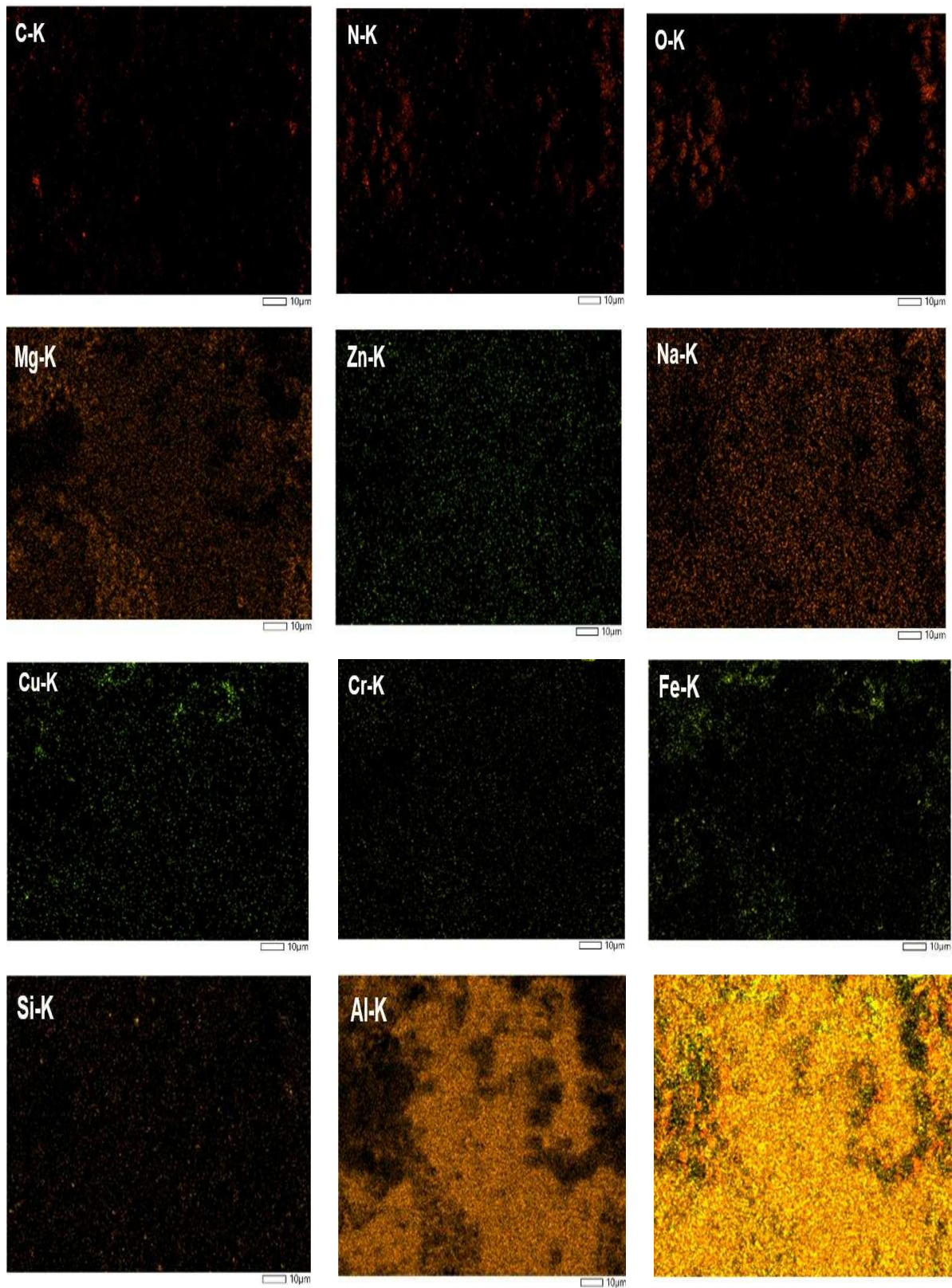
Figura 27 - Espectro de EDS da superfície com tratamento de nitretação a plasma



Fonte: Autoria própria (2025)

Durante o processo de nitretação, o alumínio, elemento predominante na liga 7075-T6, estabelece uma reação química com o nitrogênio, resultando na formação de nitreto de alumínio (AlN). A análise por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) demonstra a interação através da correlação espacial entre regiões de elevada concentração de alumínio e nitrogênio na superfície do material. A Figura 28 demonstra o mapa de elementos de uma superfície de 7075-T6 submetida ao processo de nitretação a plasma, obtida através de análise com EDS. O mapeamento elemental do nitrogênio destaca-se como o indicador primário da eficácia do tratamento de nitretação. A distribuição elemental revela a distribuição de nitrogênio e dos demais elementos de liga em uma região superficial, com diminuição progressiva do nitrogênio em direção ao núcleo da amostra, caracterizando assim a formação de uma camada nitretada com gradiente de concentração

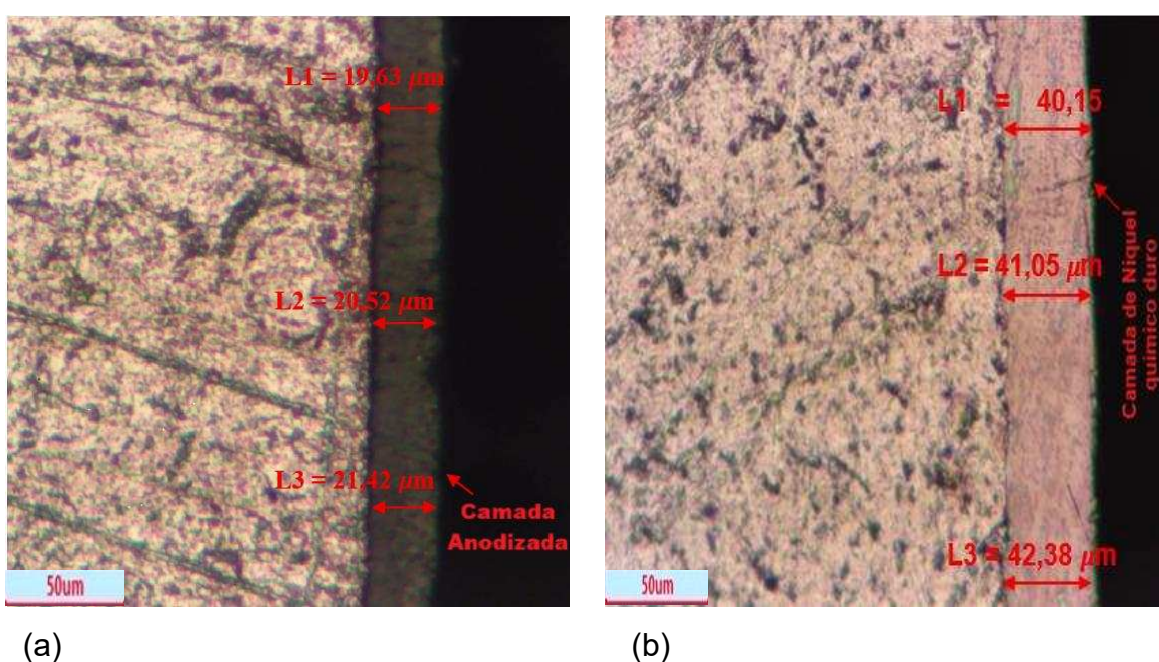
Figura 28 - Mapa de distribuição dos elementos químicos (EDS/MEV)



Fonte: Aatoria própria (2025)

A camada de anodização dura formada sobre a liga de alumínio 7075-T6 e a camada depositada de níquel duro, seguem demonstradas nas Figuras 29 (a) e (b), respectivamente. Para a realização da análise metalográfica as amostras foram preparadas conforme norma ASTM E3 e foram analisadas com a utilização de microscópio óptico. A realização do ataque para revelação da microestrutura foi realizada com a utilização do reagente Keller.

Figura 29 – Imagem de superfície anodizada obtida com aumento de 200X (a) e Imagem de superfície revestida de níquel duro, ampliação de 200X (b)



Fonte: Autoria própria (2025)

A amostra submetida ao processo de anodização dura apresentou uma espessura de camada média de $20,52 \mu\text{m}$, conforme observado na Figura 28 (a). Já a amostra submetida ao processo de revestimento com níquel duro químico apresentou uma espessura de camada média de $41,19 \mu\text{m}$, conforme observado na Figura 28 (b).

4.2 DUREZA

Foram realizados ensaios de dureza Vickers no revestimento e substrato das amostras, através da aplicação de uma carga de $0,98 \text{kgf}$, para as diferentes condições de amostras analisadas. Com tempo de patamar de 10 segundos, foram realizadas 3

medições por amostra para análise da dureza superficial. Na Tabela 12 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de dureza superficial.

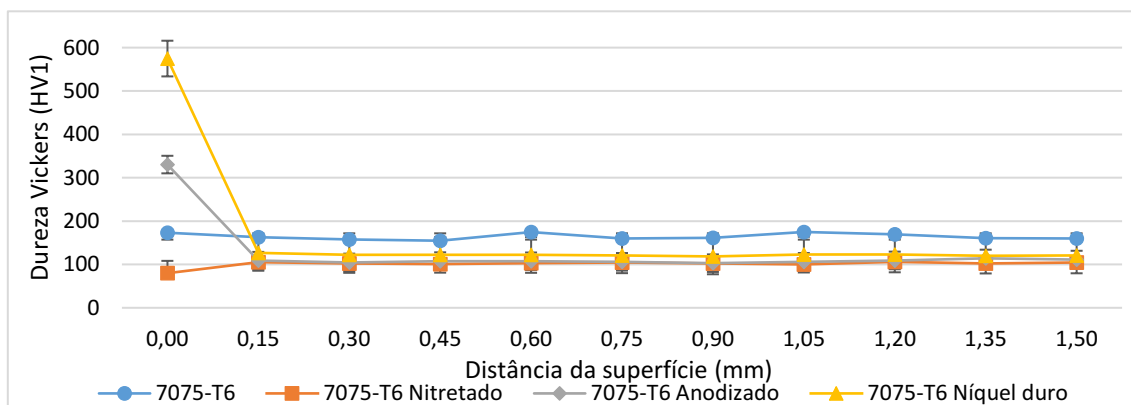
Tabela 12 - Resultados ensaios de dureza HV

CP	D1	D2	D3	Média (HV)
7075-T6	168,5	174,2	176,9	173,2±4,3
7075-T6 Nitretado	78,4	78,2	83,2	79,9±2,8
7075-T6 Anodizado	319,0	338,0	334,0	330,3±10,0
7075-T6 Níquel duro	563,8	579,2	581,4,9	574,8±9,6

Fonte: Autoria própria (2025)

Na condição nitretada, a dureza superficial diminuiu aproximadamente 54% devido à dissolução do precipitado causada pela alta temperatura (450 °C) e pelo longo tempo de tratamento (3 h). Condição semelhante também relatada por Camarinha (2018), onde o resultado de dureza da liga 7075-T6 de 171,0 HV após nitretada foi a 77,7 HV, Rocha (2018) observou resultados semelhantes analisando a liga 7075-T651 com dureza 174,4 HV, após o processo de nitratação a dureza média encontrada foi 80,5 HV e também ASL et al. (2022) obteve medidas de 215HV antes e 72HV após o processo de nitratação a plasma da liga 7075-T6. Segue abaixo a Figura 30, com os resultados do ensaio de dureza realizados na seção transversal das amostras analisadas, desde a superfície até a profundidade de 1,5 mm. Foram realizadas 10 medições em cada amostra, para objeção do perfil de dureza transversal.

Figura 30 - Ensaio de dureza da seção transversal das amostras



Fonte: Autoria própria (2025)

4.3 RUGOSIDADE

Foram realizadas 3 medições na superfície de cada amostra e as médias aritméticas obtidas, seguem demonstradas na Tabela 13 (todos os processos de revestimento aplicados nas amostras permitem o polimento para melhora da rugosidade superficial).

Tabela 13 - Resultados dos ensaios de rugosidade Ra, Rz e Rt

CP	Médias Obtidas (μm)		
	Ra	Rz	Rt
7075-T6 Polido	0,047	0,338	0,735
7075-T6 Nitretado	0,194	1,876	3,535
7075-T6 Anodizado	0,435	3,655	5,860
7075-T6 Níquel duro	0,084	0,677	1,037

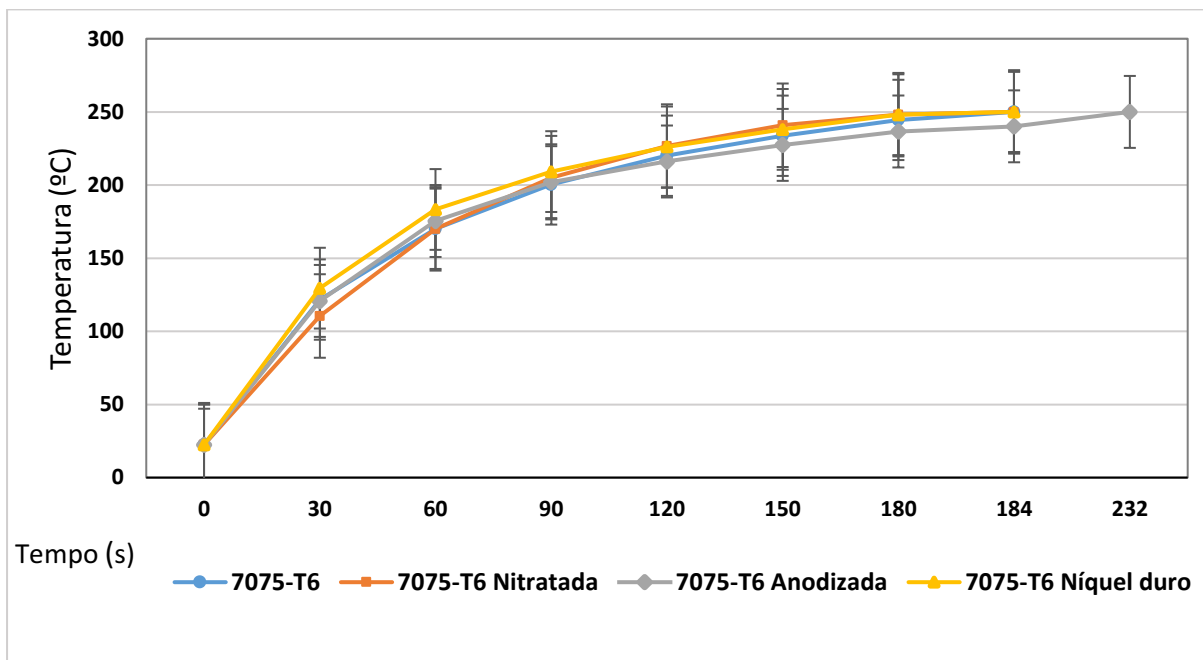
Fonte: Autoria própria (2025)

Verificou-se um aumento considerável na rugosidade superficial nas amostras submetidas à nitretação a plasma, em comparação com ao substrato polido, conforme também relatado por Gredelj (2002), Taweesub (2010), Camarinha (2018) e Rocha (2018). Esse aumento pode ser atribuído ao impacto de íons com elevada energia cinética sobre a superfície do material. Isso ocorre porque a nitretação a plasma é um processo de difusão, no qual a formação da camada nitretada e a manutenção da temperatura durante o tratamento são resultado das colisões constantes de íons com o substrato, Taweesub et al. (2010).

4.4 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Durante o processo de monitoramento da temperatura no interior das amostras de 7075-T6 e 7075-T6 nitretadas, 7075-T6 anodizadas e 7075-T6 revestida de níquel duro químico, as amostras foram submetidas a 5 ciclos de aquecimento cada, até a temperatura no interna estabilizar-se com a superfície aquecida à 250°C. A Figura 31 ilustra as curvas de aquecimento obtidas.

Figura 31 - Resultados ensaios de condução térmica ao longo do tempo



Fonte: Autoria própria (2025)

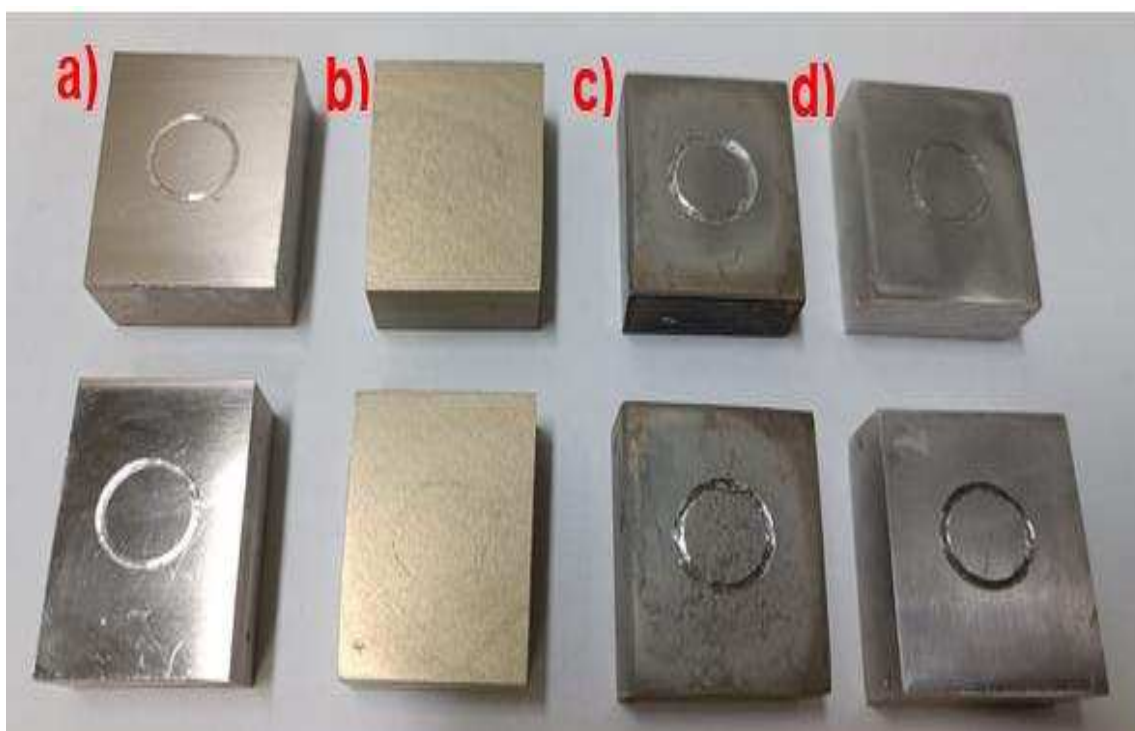
De forma geral, não foi evidenciada relevante diferença na condutividade térmica nas amostras avaliadas. Na amostra de 7075-T6 anodizada, a camada de óxido anodizado proporciona maior isolamento térmico, em temperaturas elevadas (acima de 120°C), em comparação com o alumínio bruto, tendo em vista que a temperatura de trabalho de um molde de injeção normalmente é inferior a 120°C (conforme demonstrado na Tabela 1), porém na prática, o desvio encontrado não possui relevância e sendo estatisticamente similar as demais curvas de condutividade térmica obtidas.

4.5 ENSAIO DE PINO DISCO

As amostras foram submetidas ao ensaio de desgaste por deslizamento mediante o emprego de um tribômetro (equipamento do tipo pino-disco), foram avaliados através de um método de ensaio controlado, que simula condições de atrito e desgaste entre superfícies em movimento relativo, procedimento laboratorial destinado à avaliação do desgaste. Esta metodologia padronizada emprega um conjunto definido de parâmetros experimentais (força aplicada, velocidade de

deslizamento, características dos materiais, entre outros). Adicionalmente, é possível determinar o coeficiente de atrito através deste procedimento, ASTM G99 (2017). Essa técnica de ensaio é empregada para avaliar o desgaste causado pelo deslizamento entre superfícies com áreas de contato reduzidas. O equipamento utilizado apresenta uma esfera presa em um dispositivo com a aplicação de uma carga normal determinada, sobre as superfícies das amostras em rotação. O resultado do ensaio é a formação uma pista de desgaste circular no disco (amostra). Os testes foram realizados utilizando esferas de aço AISI 52100 com 6mm de diâmetro. A Figura 32 apresenta os corpos de prova (CPs), de 7075-T6 (sem pós tratamento superficial), nitratado, anodizado e revestido com níquel duro químico, respectivamente apresentados abaixo.

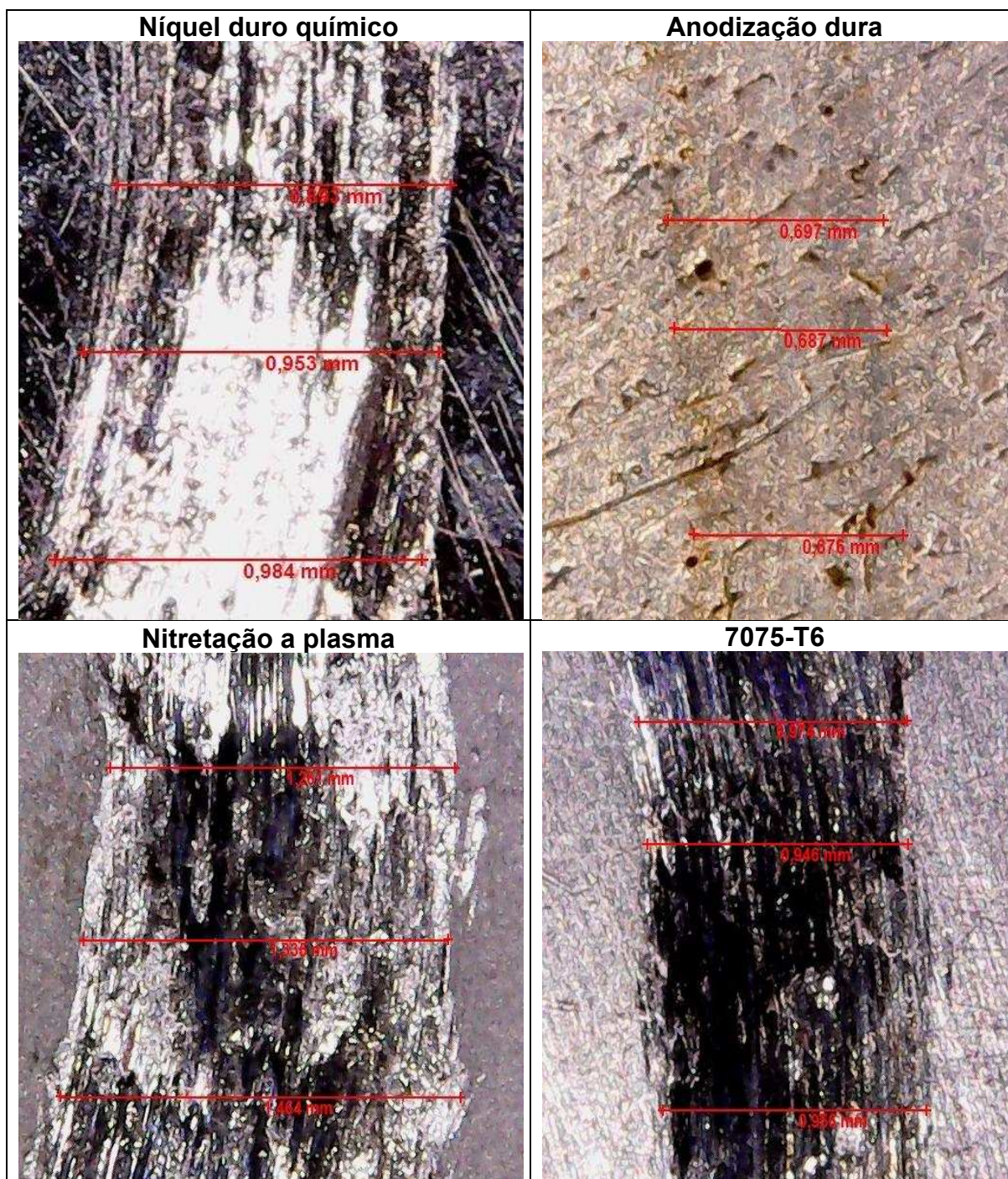
Figura 32 - Amostras submetidas ao ensaio de pino disco (a) revestida de níquel, (b) Anodização dura, (c) nitretação a plasma e (d) 7075-T6



Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 33 apresenta imagens ampliadas das pistas de desgaste formadas pela aplicação do ensaio de pino disco nos diferentes revestimentos estudados. As imagens foram obtidas através de câmera digital, com ampliação de 100X.

Figura 33 - Imagens ampliadas das pistas de rolagem



Fonte: Autoria própria (2025)

A imagem da superfície anodizada revela imperfeições oriundas do processo de anodização e a integridade do revestimento. As medições realizadas nas imagens das pistas de desgaste apresentadas na Figura 33 são imprecisas, servindo apenas para orientação de escala, pois não é possível precisar os limites das trilhas de desgaste. Medições precisas foram realizadas com auxílio de perfilômetro óptico.

4.5.1 Volume de material removido e topografia das pistas de desgaste

As fórmulas para cálculo do volume de material removido, baseadas na ASTM G99 (2017), segue demonstrada abaixo:

$$V_{\text{pino}} = \frac{\pi h}{6} \left(\frac{3d^2}{4} + h^2 \right) \text{ (mm}^3\text{)}$$

$$V_{\text{disco}} = 2\pi R \left[r^2 \sin^{-1} \left(\frac{d}{2r} \right) - \frac{d}{4} (4r^2 - d^2)^{\frac{1}{2}} \right] \text{ (mm}^3\text{)}$$

Onde:

$$h = r - \left(r^2 - \frac{d^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}}$$

R = Raio da pista de desgaste

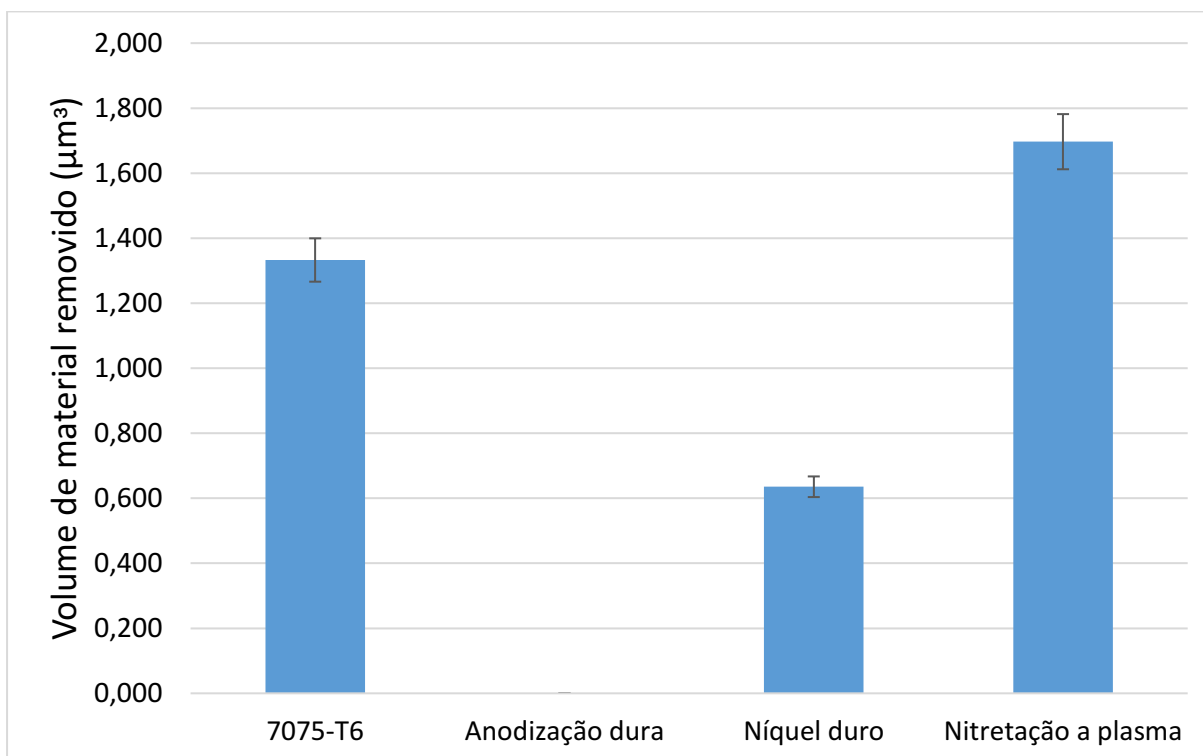
V = Perda de volume

d = Diâmetro do desgaste

r = Raio do pino

Após o ensaio de pino disco a amostra submetida ao processo de anodização dura não apresentaram relevante desgaste superficial, sendo considerado zero por não ser possível medir com o perfilometro utilizado para medição, demonstrando um excelente ganho de resistência ao desgaste. A amostra revestida de níquel duro químico também apresentou relevante ganho de resistência ao desgaste em comparação ao seu substrato (7075-T6). Já as amostras submetidas ao processo de nitretação a plasma apresentaram uma relevante piora na resistência ao desgaste. A Figura 34 ilustra o gráfico comparativo do volume de material removido, obtido através da análise das pistas de desgaste das amostras analisadas.

Figura 34 - Volume de material removido



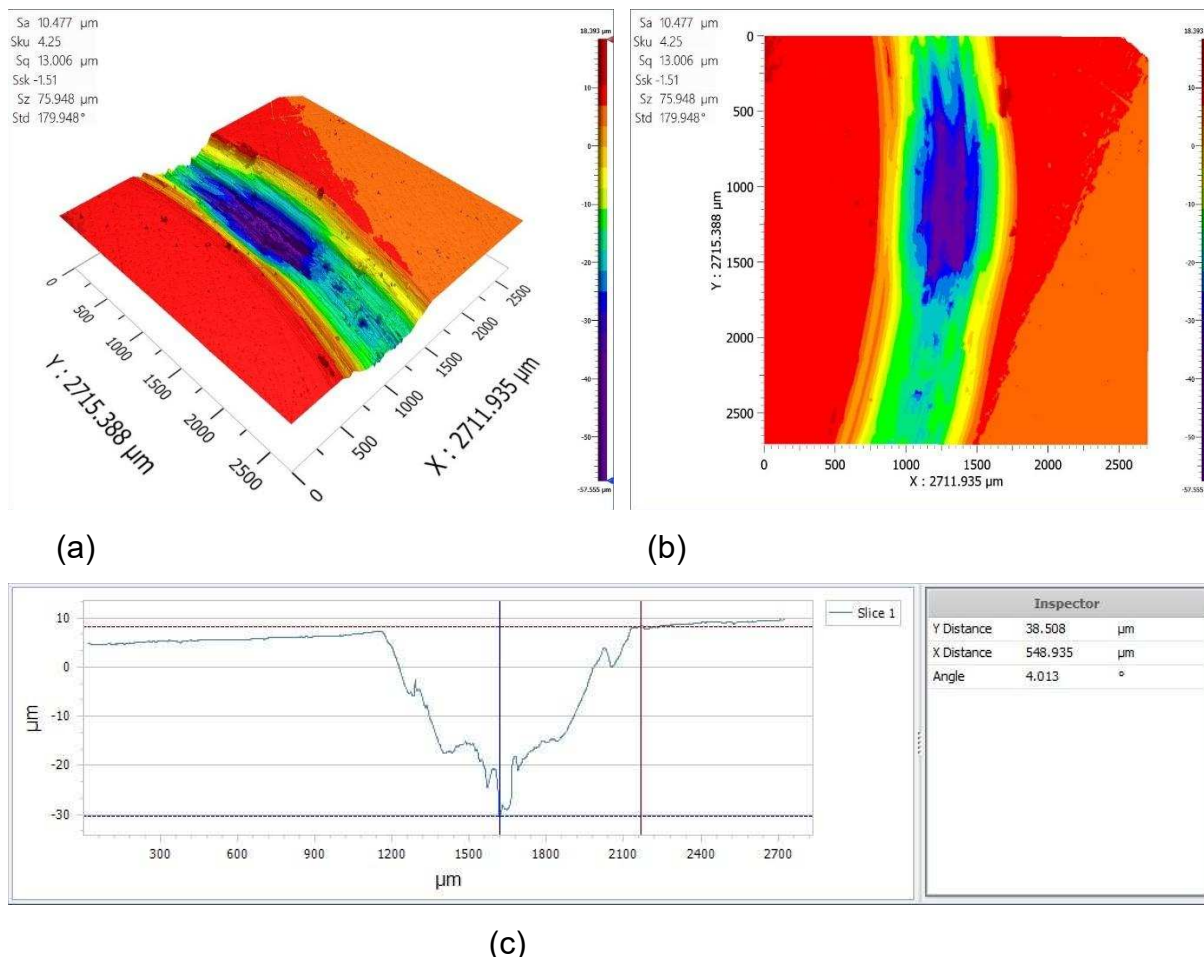
Fonte: Autoria própria (2025)

Ainda que a dureza seja comumente correlacionada com a resistência ao desgaste, esta não constitui o único parâmetro decisivo em sistemas tribológicos. Características como a natureza, dimensões e morfologia dos precipitados existentes no material exercem igualmente influência significativa sobre o comportamento tribológico e a performance ante os mecanismos de desgaste.

A ASM (1992), descreve o desgaste como uma característica não uma propriedade do material, envolvendo diferentes parâmetros, não apenas a parte desgastada (volume removido). A Norma DIN 50320 apresenta quatro importantes elementos a serem observados: o corpo sólido, contracorpo, elemento interfacial e o meio. Formando um tribosistema, onde os quatro elementos apontados atuam como parte importante no processo de desgaste.

A técnica sem contato, utiliza luz para fornecer imagens tridimensionais detalhadas de superfícies com alta precisão. Análise topográfica das amostras revestida com níquel duro, anodizada, nitretada e 7075-T6 (sem revestimento), seguem demonstradas nas Figuras 35 (a), (b) e (c).

Figura 35 – Imagens da topografia da trilha de desgaste 3D (a), 2D (b) e curva de perfil topográfico de amostra revestida com níquel duro (c).

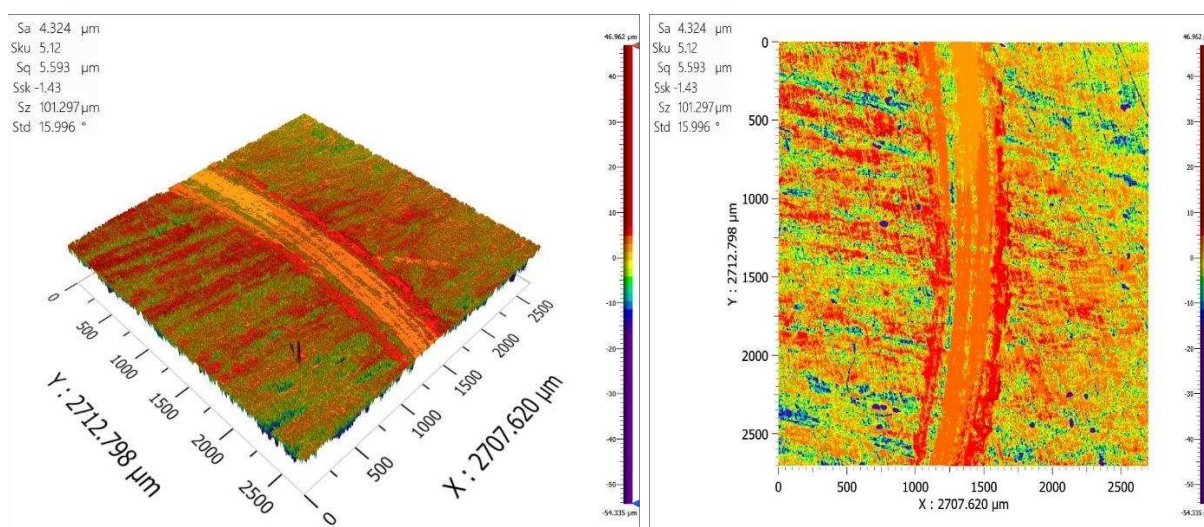


Fonte: Autoria própria (2025)

A análise topográfica da pista de desgaste em amostra revestida com níquel duro, apresentou diferentes níveis de profundidade na trilha de desgaste, que podem ser identificadas pelas diferentes tonalidades de cores (verde, amarelo, azul e roxo), conforme escala presente nas Figuras 35 (a) e (b). A diferença entre o ponto mais alto e a maior profundidade de desgaste observada foi de 38,508 μm no centro da trilha de desgaste, conforme apresentado na Figura 35 (c). A curva do perfil observado na trilha de desgaste, apresenta características de desgaste potencializado pelo acúmulo de partículas duras liberadas do ensaio no fundo da trilha de desgaste, formando um perfil com características menos circular, que os observados nas trilhas das amostras de 7075-T6 e submetida ao processo de nitratação a plasma. As Figuras 36 (a), (b) e

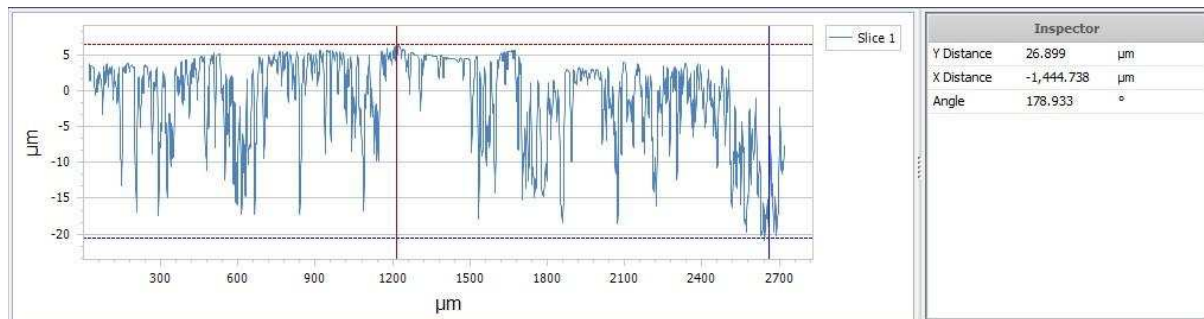
(c) demonstram a topografia e perfil topográfico de amostra submetida ao processo de anodização dura, após o ensaio de pino disco.

Figura 36 – Imagens da topografia da trilha de desgaste 3D (a), 2D (b) e curva de perfil topográfico de amostra submetida ao processo de anodização dura (c).



(a)

(b)



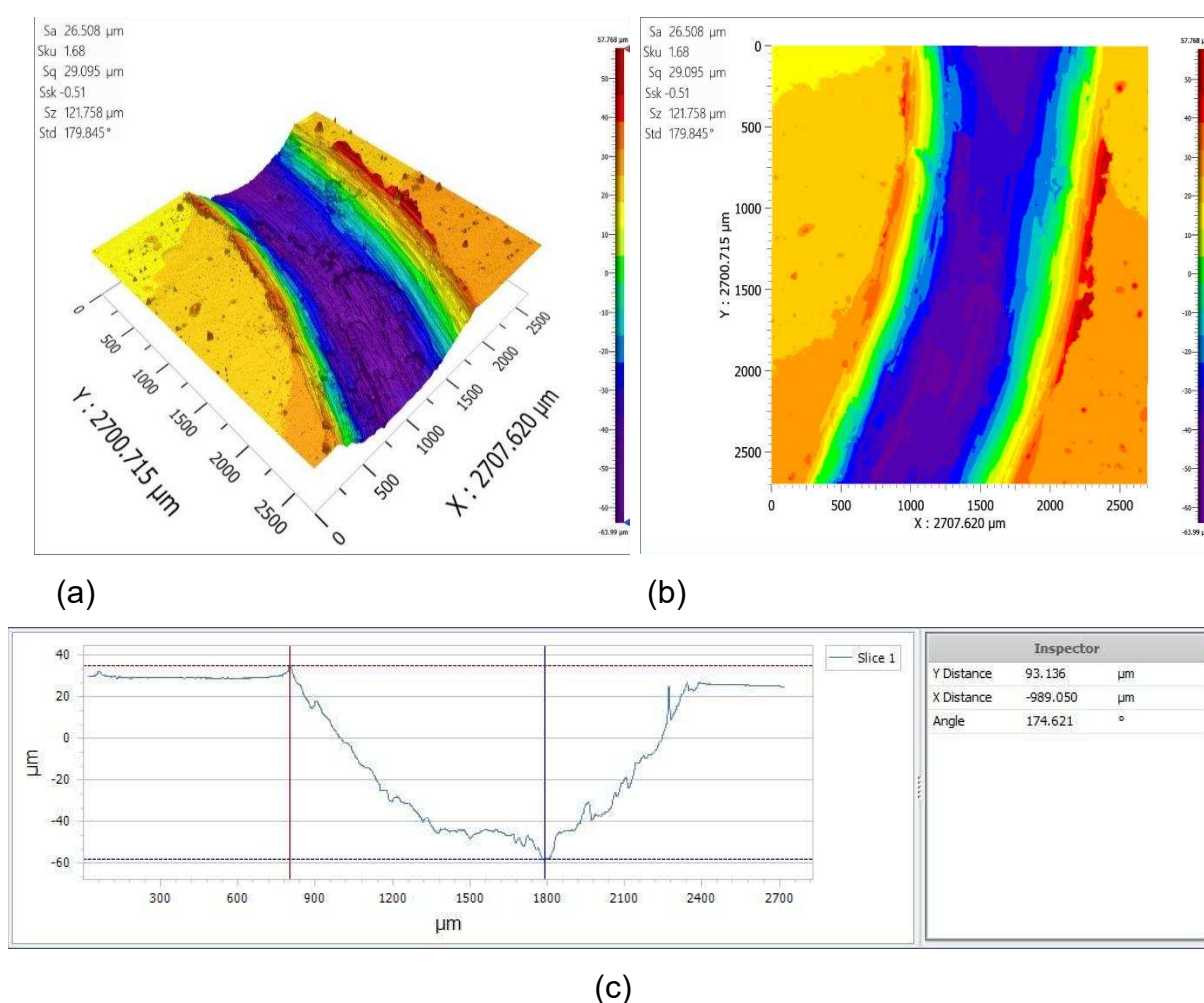
(c)

Fonte: Autoria própria (2025)

A amostra analisada submetida ao processo de anodização dura apresentou uma compactação na trilha de desgaste com predominância de tons amarelo e laranja (altura positiva ou baixa profundidade), Figura 36 (b). Diferente da superfície da amostra onde tons de amarelo, vermelho, azul e roxo se misturam (Figura 36 (b)), demonstrando uma superfície heterogênea, por característica do processo de anodização dura. Na curva de perfil topográfico, onde a pista de desgaste está demonstrada entre 1200 até 1500 μm (aproximadamente), pode-se observar uma considerável menor imperfeição na superfície, se comparada com a topografia

observada na superfície fora da pista de desgaste, Figura 36 (c). Na imagem (c), pode-se observar que o menor ponto encontrado estava fora da pista de desgaste, uma fissura medindo 26,899 μm de profundidade em relação ao ponto mais alto da observação. As Figuras 37 (a), (b) e (c) apresentam a topografia e perfil topográfico de amostra submetida ao processo de nitretação a plasma, após o ensaio de pino disco.

Figura 37 – Imagens da topografia da trilha de desgaste 3D (a), 2D (b) e curva de perfil topográfico de amostra submetida ao processo de nitretação a plasma (c).

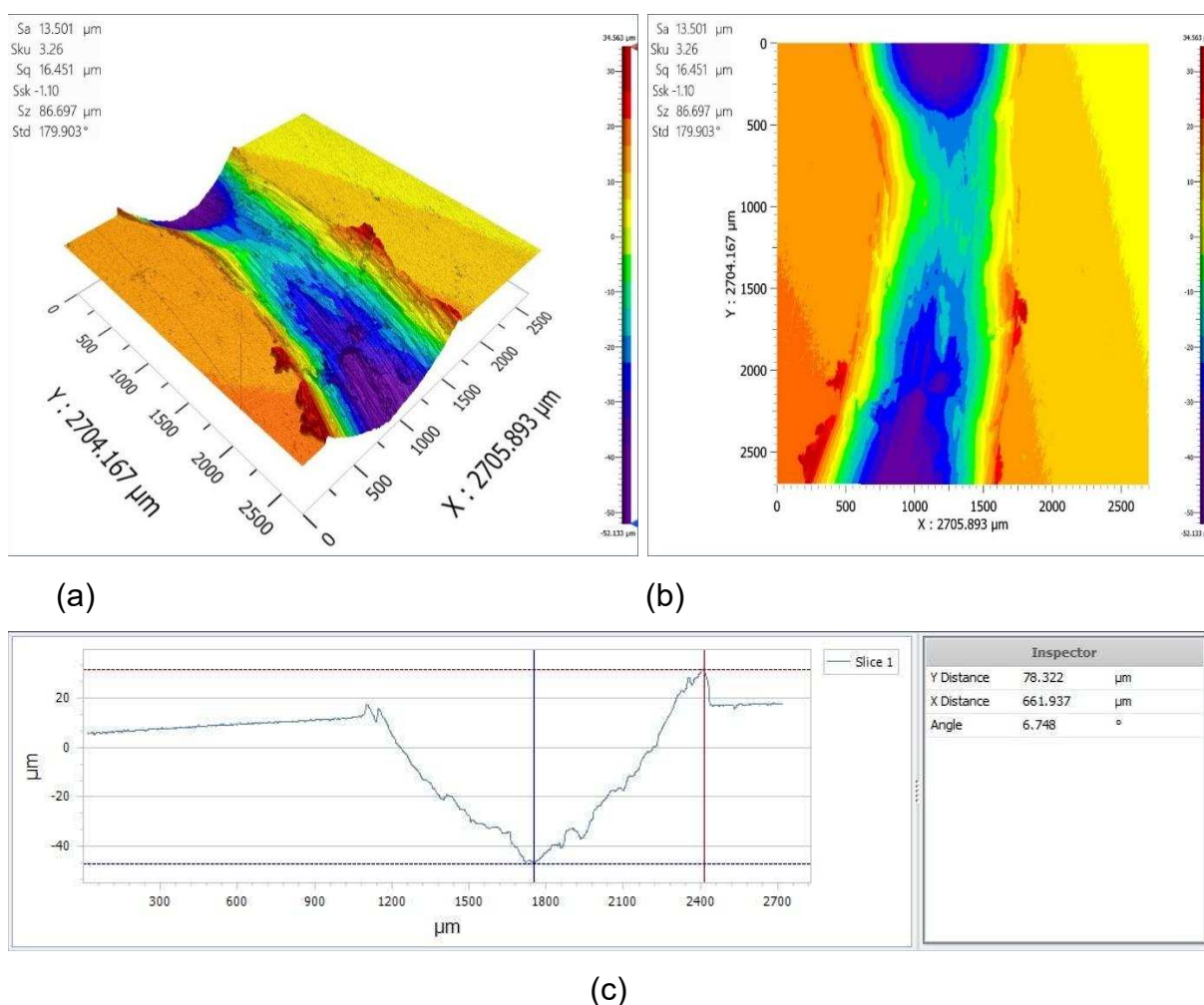


Fonte: Autoria própria (2025)

A amostra submetida ao processo de nitretação a plasma apresentou a maior quantidade de material removido, devido a elevada redução da dureza superficial resultante do processo de nitretação, gerando uma curva de perfil topográfico com características circular. A diferença entre o ponto mais alto e maior profundidade de

desgaste observada foi de 93,136 μm , próximo ao centro da trilha de desgaste, conforme observado na imagem (c). As Figuras 38 (a), (b) e (c) apresentam a topografia e perfil topográfico de amostra da liga de alumínio 7075-T6, após ser submetida ao ensaio de pino disco.

Figura 38 – Imagens da topografia da trilha de desgaste 3D (a), 2D (b) e curva de perfil topográfico da liga de alumínio 7075-T6 (c).



Fonte: Autoria própria (2025)

A amostra de 7075-T6, conforme perfilometria, apresentou variações de profundidade e espessura da trilha de desgaste gerada, que ficam evidentes na diferença de profundidade e espessura, apresentados nas Figuras 38 (a) e (b). A diferença entre o ponto mais alto e a maior profundidade de desgaste observada foi de 78,322 μm , próximo ao centro da trilha de desgaste, conforme observado na Figura 38 (c).

5 CONCLUSÃO

Com base na análise dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que:

- Mostrou-se relevante a realização do presente estudo sobre os benefícios com utilização da liga de alumínio 7075-T6, utilizando-se de revestimentos superficiais para melhorar as propriedades mecânicas e tribológicas da liga de alumínio, onde foram analisados 3 processos de revestimento superficial com a liga de alumínio 7075-T6 como substrato. As amostras revestidas com níquel duro químico e anodização dura apresentaram melhoras nas propriedades analisadas, diferentemente das amostras submetidas ao processo de nitretação a plasma que não apresentou melhora em nenhum aspecto analisado.
- As amostras na condição nitretada, observou-se uma redução de 53% na dureza superficial. Esse resultado está relacionado à elevada temperatura do processo de nitretação (450 °C) e ao tempo de tratamento (3,0 horas), fatores que favoreceram a dissolução dos precipitados responsáveis pelo endurecimento da matriz de alumínio. O processo de nitretação também apresentou relevante piora na rugosidade superficial e na resistência ao desgaste. Tendo em vista os resultados obtidos, o processo de nitretação a plasma na condição realizada no presente estudo, não se mostrou uma opção viável para melhoria das propriedades mecânicas e tribológicas desejado.
- As amostras revestidas com níquel duro químico apresentaram uma dureza superficial em média 3,3 vezes superior ao substrato (7075-T6), além de um significativo incremento na resistência ao desgaste, apresentando uma redução de aproximadamente 56% no volume de material removido por desgaste durante o ensaio pino-sobre-disco. Os ensaios realizados mostraram que o revestimento com níquel é uma boa opção para melhoria das propriedades mecânicas da liga 7075-T6 para fabricação de moldes. Entretanto, a camada de níquel depositada apresenta algumas desvantagens como: peso adicional, menor flexibilidade e alterações dimensionais que devem ser consideradas no projeto do molde.
- Em termos de resistência e durabilidade, as amostras submetidas ao processo de anodização dura não apresentaram desgaste superficial significativo, pois não foi possível mensurá-lo com o perfilômetro mecânico utilizado para medição. Tendo em

vista que o desgaste e a baixa rigidez mecânica são os principais aspectos apontados para a baixa utilização do alumínio como matéria prima para fabricação de moldes. O processo pode ser considerado o revestimento mais promissor, pois praticamente eliminou o desgaste superficial na condição estudada, demonstrando um excelente ganho de resistência ao desgaste.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do trabalho desenvolvido, são sugeridos os seguintes trabalhos para desenvolvimento futuro:

Pesquisar novos parâmetros para realização do processo de nitretação a plasma na liga de alumínio 7075-T6, visando obter melhora nas propriedades mecânicas e tribológicas da liga estudada.

Fabricação de moldes ou cavidades com revestimento superficial, para fins comparativos, analisando quesitos como: processo de fabricação, durabilidade, tempo de ciclo e qualidade das peças injetadas.

Realizar de ensaio tribológico de microabrasão, para complementar a análise de desgaste por deslizamento realizada com ensaio de pino disco.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, G.; SOUZA, W. **Moldes e matrizes: características, desenvolvimento e funcionalidades para transformações de plásticos**. 1ª ed. São Paulo: Érica, p.136, 2015.

ALUMINUM ASSOCIATION. **International alloy designations and chemical composition limits for wrought aluminum and wrought aluminum alloys**. Arlington, Virginia, 2006.

ALUMINUM ASSOCIATION. *International alloy designations and chemical composition limits for wrought aluminum and wrought aluminum alloys*. Arlington, Virginia, 2009.

ARAUJO, J. V. S.; et al. **O processo de anodização do alumínio e suas ligas: uma abordagem histórica e eletroquímica**, Nova química Vol.44, São Paulo , SP, 2021.

ARIETA, F.G.; et al. **Aplicação de ligas de alumínio em moldes para injeção de termoplásticos**. Disponível em:<<https://www.revistaferramental.com.br/artigo/aplicacao-ligas-aluminio-moldes-para-injecao-termoplasticos/>>. Acesso em: 12/08/2023.

ASL, H. G.; et al. **Investigation of the friction and wear properties of nitrided 7075-T6 aluminum alloy under vacuum and ambient air**. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, v. 28, n. 1, p. 63-71, 2022.

ASM - American Society of Materials. **International Handbook**. Aluminum Mill and Engineered Wrought Products, Properties and selection of nonferrous alloys and special-purpose materials. Materials Park: ASM Internacional, Vol.2, 1990.

ASM INTERNATIONAL. HANDBOOK COMMITTEE. ASM handbook: **Friction, lubrication, and wear technology**. ASM International, 1992.

ASM METALS HANDBOOK. **Heat Treating**. Vol 4, 10. ed. ASM International, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14231: Tratamento de superfície do alumínio e suas ligas - Anodização para fins técnicos - Anodização dura**. Rio de Janeiro, p. 2. 2005.

ASTM G77. **Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test**, U.S, 1991

ASTM B209/209M. **Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate**, U.S , 2021.

ASTM G99. **Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

AZEVEDO, I.A. **Análise do desgaste por abrasão de rotors em aço inoxidável AISI 304 de bombas de estação elevatória de água bruta de eta's, variando a carga de sedimentos**. Monografia. Univerdidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2019.

BARBOSA, L. S. **Desenvolvimento de molde para a injeção de polímeros termoplásticos**. [S.I.], 2020. Disponível em: <https://fei.edu.br/sites/artigossicfei2020/020SICFEI2020_ARTIGO.pdf> Acesso em: 02/05/2025.

BARBOSA, L. M. **Influência da taxa de aquecimento no tratamento térmico de solubilização da liga Al 7075**. 2014. 85f. Dissertação (Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2014.

BHUSHAN, B. **Introduction to Tribology**. John Wiley & Sons: New York, 732p., 2002.

BERGSTROM, J.; et al. **Wear of die materials in full scale plastic injection moulding of glass fibre reinforced polycarbonate**. *wear*, 251, 1511–1521, 2001.

BRITO, A. M.; MATOS, A.; PONTES, A. P. **Manual do Projectista para Moldes de Injeção de Plásticos**. Vol. 3 - Tipificação dos Moldes. Marina Grande, Centimfe, 2004.

CALLISTER, W. D., **Materials Science and Engineering, an Introduction**, Wiley, 7th ed., 2007.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais Uma introdução**. 5 ed. Rio de Janeiro – RJ, Editora LTC, 2002.

CAMARINHA, L. O. **Avaliação do comportamento mecânico e da resistência à corrosão da liga de alumínio 7075-T651 nitretada a plasma**. 2018. 78f. Dissertação (Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais) - Universidade Federal de São Paulo, São José dos Campos, 2018.

COUTINHO, C. B. **Materiais Metálicos para Engenharia**. Belo Horizonte, Fundação Christiano Ottoni, 1992.

DULEBA, B.; Greskovic, F. **Conformal Cooling for Plastics Injection Moulding**. St rojar, 1-5, ISSN 1338-0761, 2012.

ETTORE, B. Filho. **Seleção de metais não ferrosos**. 2 ed. São Paulo: Editora da UNICAMP, 1997.

FERREIRA et al. **Moldes de Injeção de Alumínio: Efeitos das Propriedades Térmicas do Material do Molde nos Parâmetros de Injeção e Projeto do Molde**. 12º Congresso Brasileiro De Engenharia De Fabricação, Brasília, DF, 2023.

GOODSHIP, V.; MIDDLETON, B.; CHERRINGTON, R. **Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality**. [s.n.],2016. ISBN 9780323340618. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323340618000041>>. Acesso em: 21/08/2024.

GREDELJ S.; et al. **Characterization of Aluminium Surfaces With and Without Plasma Nitriding by X-Ray Photoelectron Spectroscopy**. Applied Surface Science . Vol.174, Iss. 3-4, 240-250, 2001.

HARADA, J. **Moldes para Injeção de Termoplásticos – Projetos e Princípios Básicos**. São Paulo: Artiber, 2004.

HE, B. **Research on the failure and material selection of plastic mold**. *Procedia Engineering*, 23, 46–52, 2011.

HUAMIN, Z.; Bo, Y.; YUN, Z. **3D filling simulation of injection molding**. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 204, Iss. 1-3, 475-480, 2008.

KARTHIK, B.M.; et al. **Peak hardness stability analysis of Al7075 alloy dispersed with Ni coated duralumin powder during natural aging phenomena**. Índia, 2023.

KAVALCO, P. M. **Caracterização de material composto de matriz metálica a partir de uma liga de alumínio aeronáutico reciclado**. 2011. 123f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

KENNEDY, P. K. **Practical and scientific aspects of injection molding simulation** . 155 f. Thesis for doctor in Eindhoven University of Technology, Netherlands. 2008.

KING, D. **Lessons Learned with Aluminum Tooling. MoldMaking Technology**; 2016. <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/lessons-learned-with-aluminu_mtooling >. Acesso em: 01/09/2024.

KULKARNI, S. **Robust Process Development and Scientific Molding: Theory and Practice**. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2017. ISBN 9781569906910. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=qOUIDwAAQBAJ>>. Londres. Anais World Congress on Engineering. Londres, 2009. Acesso em : 01/02/2025.

KUMAR, S. M.; et al. **Evaluation of fracture toughness and mechanical properties of aluminum alloy 7075, T6 with nickel coating**. Procedia Engineering, v. 97, p. 178-185, 2014.

MALONEY, J.L. **Friction and Wear of Tool Steels, Friction, Lubrication, and Wear Technology**, Vol 18, Asm Handbook, Asm International, 1992, P 734–740.

MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes**. São Paulo: Artliber, 2005.

MARQUES, S.; et al. **Design of conformal cooling for plastic injection moulding by heat transfer simulation**. Polimeros, Scielo, v. 25, p. 564 – 574, 12 2015. ISSN 0104-1428. Disponível em: < <http://moldesinjecaoplasticos.com.br/tabelas-com-valores-paraaplicacoes-de-plasticos/> >. Acesso em: 01/09/2024.

MAZUR, K.; STEFAŃSKA, A.; HEBDA, M. **Analysis of chemical nickel-plating process**. Materials Science, v. 54, n. 3, p. 387-394, 2018.

MIL-PRF-8625. **Anodic Coatings for Aluminum and Aluminum Alloy**. Assist, 2020. < https://quicksearch.dla.mil/qsDocDetails.aspx?ident_number=7074 >. Acesso em: 05/10/2025.

MOARTELLI, M.; COSTA, C. A. **Plástico virtual**, Disponível em: < <https://plasticovirtual.com.br/produto/preparador-tecnico-de-aquinas-injetoras/> > Acesso: 20/082024.

MORADSHAHI, M.; et al. **Plasma nitriding of al alloys by dc glow discharge. surface& coatings technology**. Irã,p. 567-574, Jan, 2006.

MOREIRA, M. F. **Ligas de Alumínio Conformadas**: Alumínio e suas ligas. Disponível em:<<http://www.dalmolim.com.br/EDUCACAO/MATERIAIS/Bibliomat/aluminioconf.pdf>>. Acessado em: 28 de Setembro de 2025.

OGLIARI, A.; et al. **Cooling Channel Optimization For Injection Molding**. In: Numiform'07: International Conference On Numerical Methods In Industrial Forming Processes. Anais Numiform 2007. Porto, 2007. P. 525-530.

OLIVEIRA, G. R. G. **Tratamento térmico de uma liga Al-Si-Mg-Mn. 2012. 75f.** Dissertação (Mestre integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Porto, 2012.

PARK, H. S.; DANG, X. P. **Design and simulationbased optimization of cooling channels for plastic injection mold, New technologies: trends, innovations and research**, Prof. Volosencu, C. (Ed.), Isbn: 978-953-51-0480-3, InTech, 19-44, 2012.

PARK, H.S., DANG, X.-P. **Development of a smart plastic injection mold with partir de uma liga de alumínio aeronáutico reciclado.** 2011. 123f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

PEREIRA, J.P.A.; et. al. **Moldes de Injeção de Alumínio: Efeitos das Propriedades Térmicas do Material do Molde nos Parâmetros de Injeção e Projeto do Molde.** 12º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Brasília, DF, 2023.

PINHEIRO, J. S. **Proteção da Liga 117075-T6 por anodização tartárico-sulfúrica e póstratamento com ácido hexafluorozircônico.** Porto Alegre-RS: Dissertação de mestrado - PPGE3M - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.

POSTAWA, P.; KWIATKOWSKI, D.; BOCIAGA, E. **Influence of the method of heating/ cooling moulds on the properties of injectin moulding parts.** International Scientific Journal – Archives of Materials Science and Engineering. 31, 2, p.121-124, 2008.

PROTOLABS. **Electroless nickel plating services.** Disponível em: <<http://www.hubs.com/surface-finishing-services/electroless-nickel-plating-services/>>. Acesso em: 01-03/2025.

PYE, D. **Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing**. Ohio: ASM INTERNATIONAL -METAL PARK, 2003.

RASHID, O.; LOW, K.W.Q.; PITTMAN, J.F.T.; **Mold cooling in thermoplastics injection molding: Effectiveness and Energy Efficiency**. *Journal of Cleaner Production*. p.264, April 2020.

REGONE, N. N. **Anodização de Ligas de Alumínio por Corrente Pulsada**. Campinas-SP: Tese de doutorado - Universidade Estadual de Campinas, 2004.

REIS, D.A.P; et.al. **Caracterização de Ligas de Alumínio 7075-T6 Nitretadas por Plasma**, 22º CBECiMat, Natal, RN, 2016.

ROSA, L. C. Acabamento de superfície – **Rugosidade superficial**. Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2007.

SAIFULLAH, A. B. M.; MASSOD, S. H.; SBARSKI, I. **New cooling channel design for injection moulding**. in: World congress on engineering, Vol 1, 2009, Londres. Anais World Congress on Engineering. Londres, 2009.

SANT'ANNA, J. P. **Ligas metálicas especiais proporcionam melhor relação custo/benefício**. *Revista Plástico Moderno*. São Paulo, n. 437, mar. 2011. São José dos Campos, 2018.

SHETTY, K.; KUMAR, S.; Rao; P. R. **Ion-nitriding of maraging steel (250 grade) for aeronautical application**. *Journal of physics: conference series*, 100, 062013, 2008.

SHIM, Y. K; KIM, Y. K; LEE, K.H. Seunghee Han. **The properties of AlN prepared by plasma nitriding and plasma source ion implantation techniques**. *SURFACE AND COATINGS TECHNOLOGY*, Vol.131, 2000, Pages 345-349

SILVA, S. L. **Sistemática para o Projeto do Sistema de Refrigeração de Moldes para Injeção de Polímeros**. Dissertação (Mestrado em engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SOUZA, A. F., HOWARTH, J. L. L. Arendarchuck, B. E., Popiolek, A. M., Tremel Junior, C. A., & Kavilha, C. **Alternative materials to shorten injection mold manufacturing and molding cycles**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v.34, n.2, 2024. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.20230088>

SPINA, R. **Injection moulding of automotive components: comparison between hot runner systems for a case study**. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 155-156, p. 1497 – 1504, 2004. ISSN0924-0136.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W.; **Engineering tribology**. 2.ed. butterworth-heinemann: Boston, 744 P., 2001.

STEINKO, W. **Avaliação do projeto térmico do molde garante qualidade e redução de custos**. *Plástico Industrial*, ano VI, p. 64-71, Novembro, 2004.

STEVENSON JR, M. F. **Anodização**. Em: **Engenharia de Superfícies**. ASM International, 1994. p. 482-493.

STOCK, H. R. *et al.* **Fundamental and applied aspects of the plasma-assisted nitriding process for aluminium and its alloys**. *Surface and Coatings Technology*, v.94-95, p.247-254, Outubro, 1997.

SUPER FINISHING. <<https://superfinishing.com.br/produto/niquel-duro-quimico/>>; Acesso em: 25/04/2025.

VENERUS, D. C., et al. **Relaxation of Anisotropic Thermal Diffusivity in a Polymer Melt Following Step Shear Strain**. The American Physical Society, v. 82, N. 2, 366-369, ISSN 0031-9007, 1999.

APÊNDICE A – DESVIO NO PROCESSO DE NITRETAÇÃO A PLASMA

Para realização do presente estudo o processo de nitretação a plasma foram preparados 3 lotes de amostras de 7075-T6 submetidas ao processo de nitretação a plasma. Sendo que no primeiro lote produzido, as amostras foram preparadas com lixamento e polimento apenas na face superior, conforme Figura 39.

Figura 39 - Amostras polidas



Fonte: Autoria própria (2025)

Após o corte das amostras as faces que permaneceriam laterais e inferiores, durante o processo de nitretação a plasma, receberam apenas um lixamento simples com lixas de carbeto de silício granulação 220 e 400. Permanecendo com diversas imperfeições resultante do corte das amostras, as Figuras 40 (a) e (b) demonstram a preparação e o processo de nitretação.

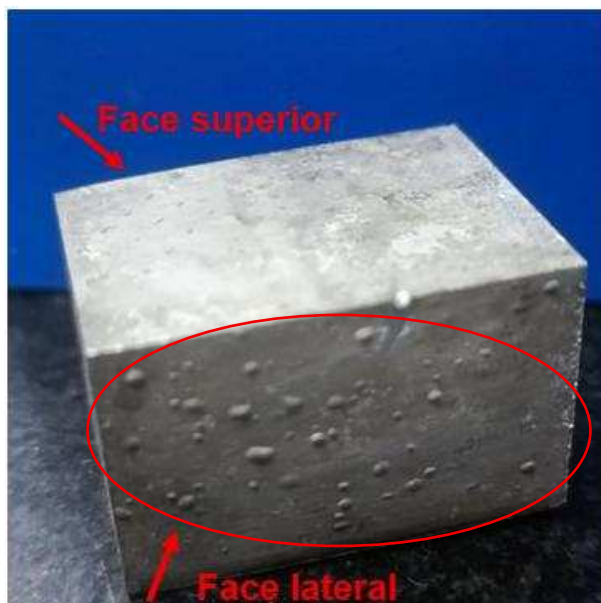
Figura 40 - (a) Amostras preparadas para nitretação e (b) Amostras em processo de nitretação a plasma



Fonte: Autoria própria (2025)

Durante o processo de nitretação observou-se diversas aberturas de arco nas superfícies das amostras dentro da câmara. Ao finalizar o processo de nitretação a plasma, as amostras apresentaram bolhas nas superfícies laterais, conforme demonstrado na Figura 41 abaixo.

Figura 41 - Amostra de 7075-T6 nitretada a plasma com bolhas nas laterais



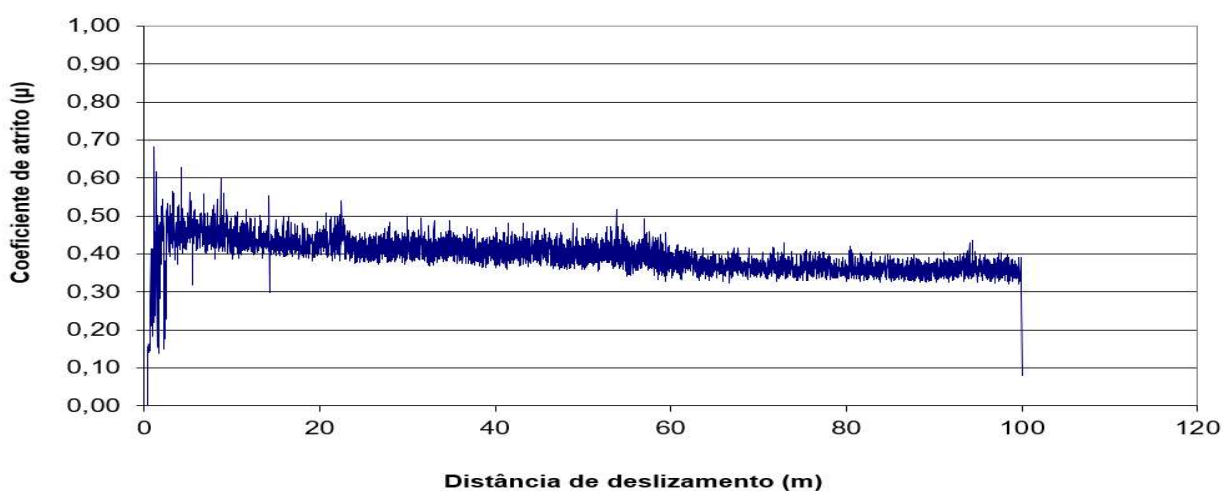
Fonte: Autoria própria (2025)

Acredita-se que o fenômeno ocorreu devido à falta de preparação adequada nas faces laterais, pois o mesmo desvio não ocorreu nos demais lotes produzidos, nos quais todas as faces foram semelhantemente preparadas para o processo de nitretação, com o devido lixamento e polimento. Esse fenômeno observado pode impossibilitar a utilização do processo de nitretação a plasma em superfícies de alumínio que necessite de uma superfície não polida.

APÊNDICE B – ANÁLISE DO COEFICIENTE DE ATRITO

Seguem abaixo as Figuras 42, 43, 44, 45, 46, 47,48 e 49 com o comportamento do coeficientes de atrito, obtidos através dos ensaios tribológicos de pino disco, realizados nas diferentes superfícies estudadas.

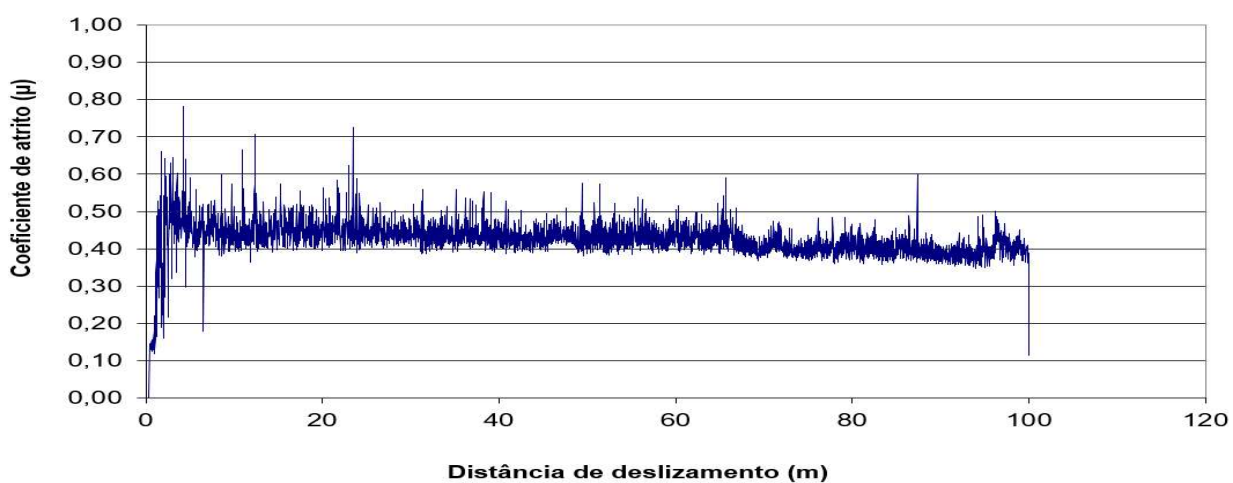
Figura 42 - Coeficiente de atrito em superfície 7075-T6 (Ensaio 1)



Fonte: Autoria própria (2025)

Média Coef. de Atrito (Ensaio 1): 0,39

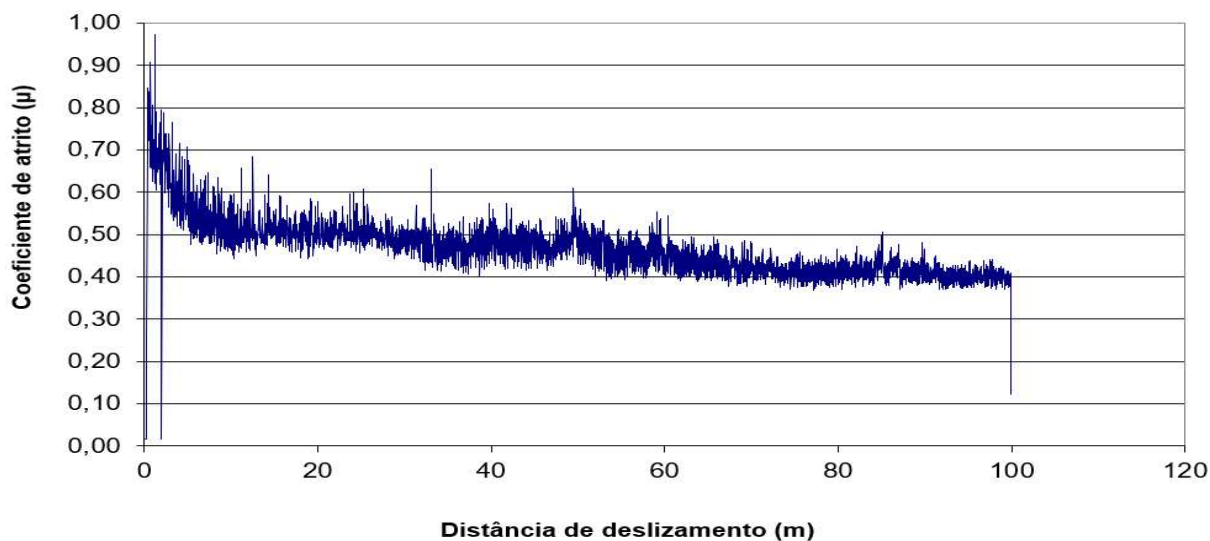
Figura 43 - Coeficiente de atrito em superfície 7075-T6 (Ensaio 2)



Fonte: Autoria própria (2025)

Média Coef. de Atrito (Ensaio 2): 0,43

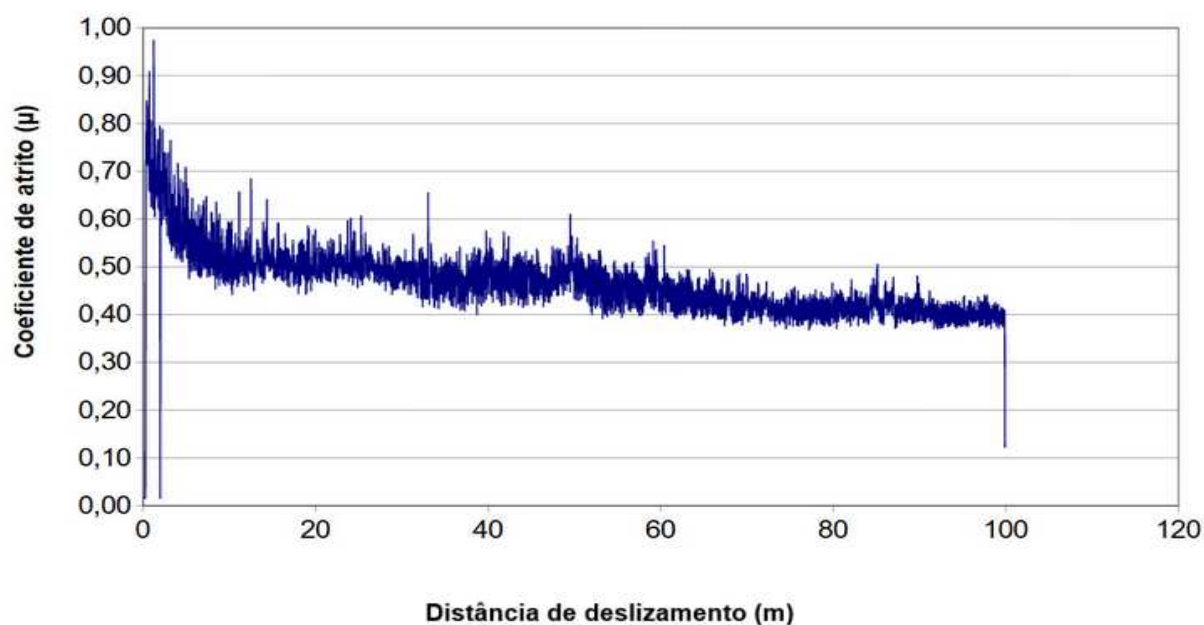
Figura 44 - Coeficiente de atrito em superfície 7075-T6 nitretada (Ensaio 1)



Fonte: Autoria própria (2025)

Média Coef. de Atrito (Ensaio 1): 0,46

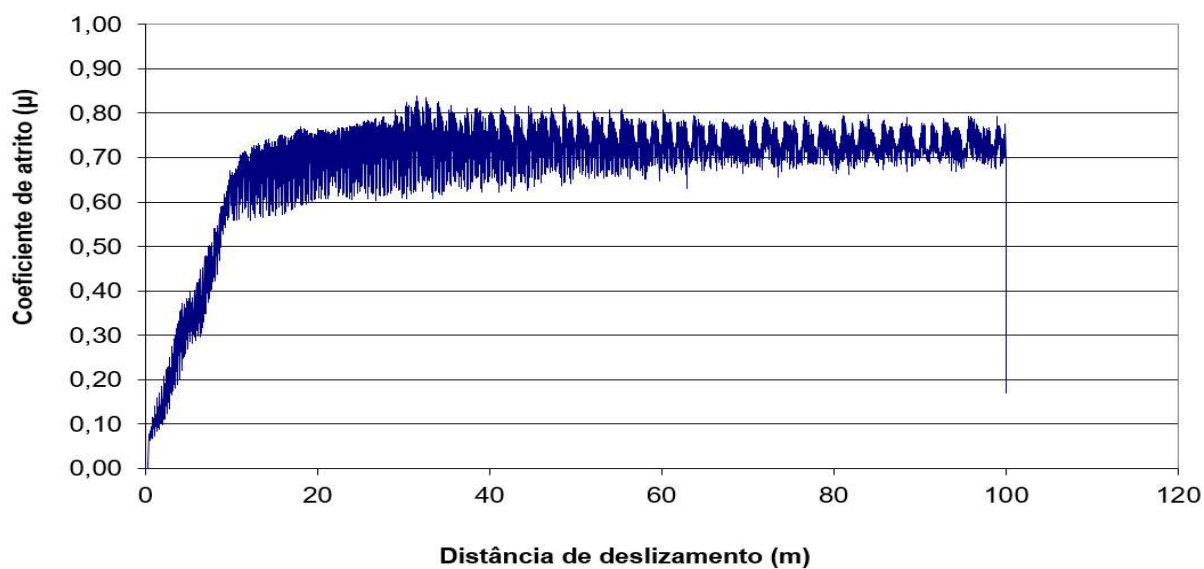
Figura 45 - Coeficiente de atrito em superfície 7075-T6 nitretada (Ensaio 2)



Fonte: Autoria própria (2025)

Média Coef. de atrito (Ensaio 2): 0,47

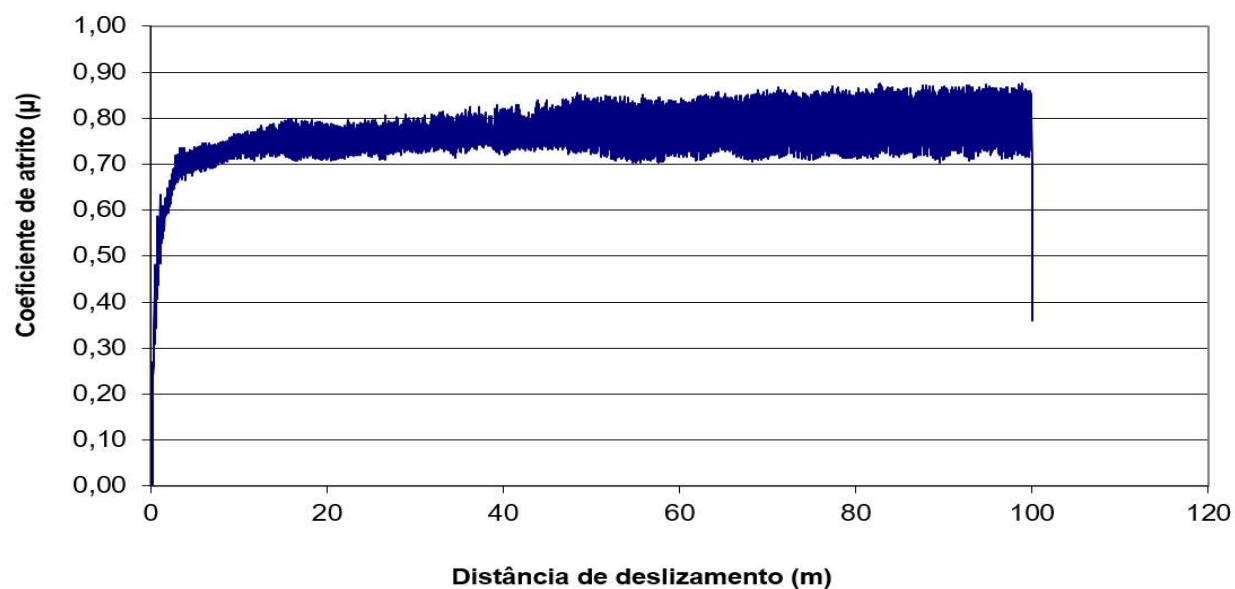
Figura 46 - Coeficiente de atrito em superfície 7075-T6 Anodizada (Ensaio 1)



Fonte: Autoria própria (2025)

Média Coef. de atrito (Ensaio 1): 0,69

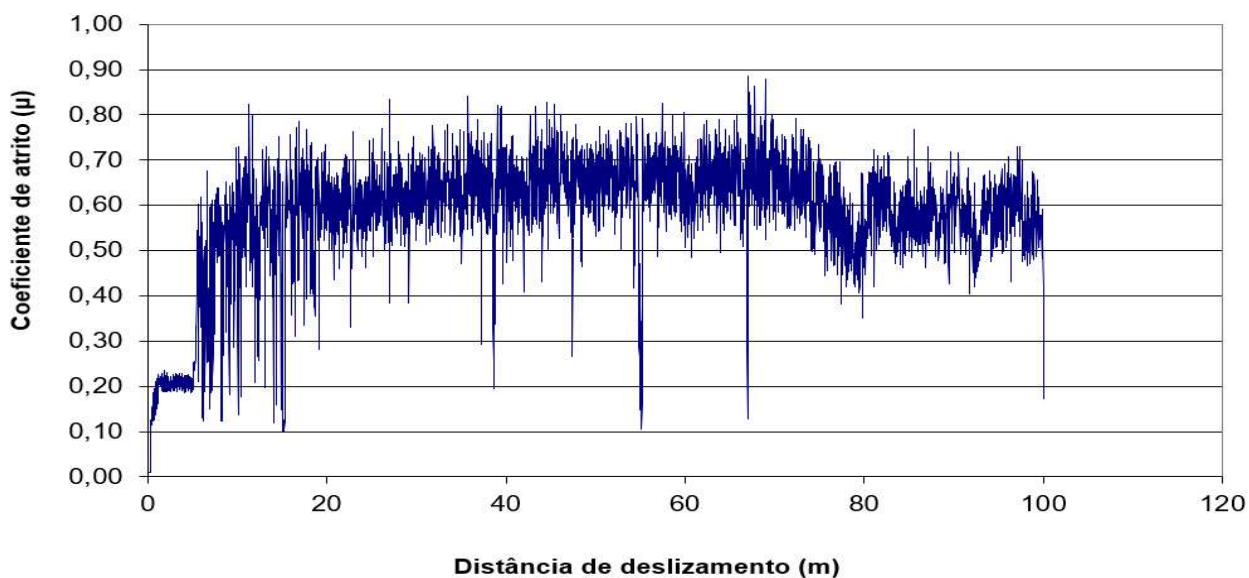
Figura 47 - Coeficiente de atrito em superfície 7075-T6 Anodizada (Ensaio 2)



Fonte: Autoria própria (2025)

Média Coef. de atrito (Ensaio 2): 0,77

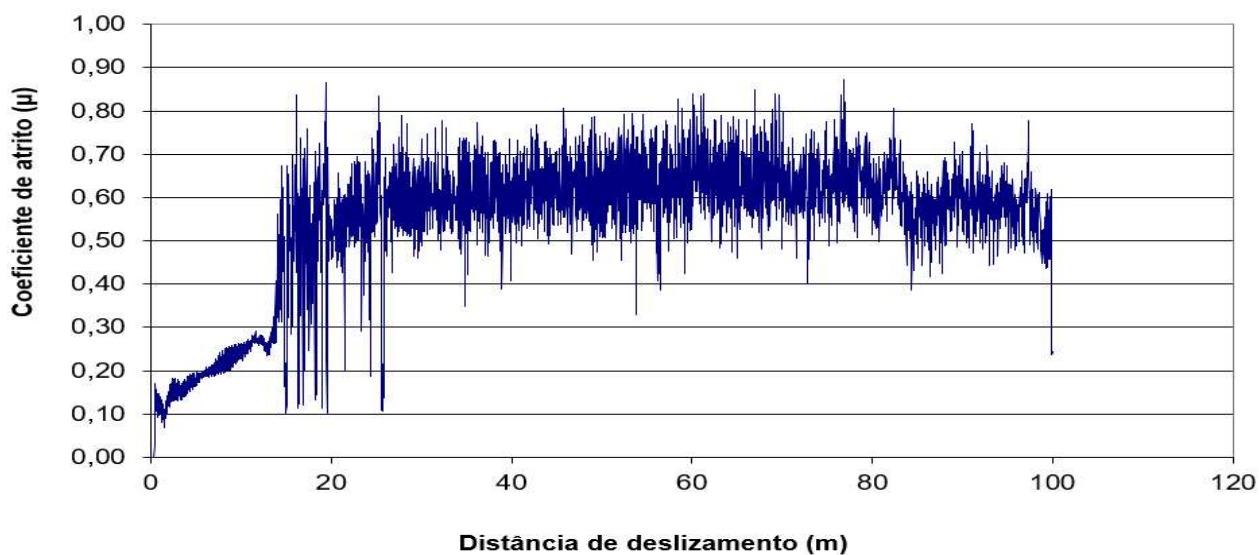
Figura 48 - Coeficiente de atrito em superfície 7075-T6 revestida com níquel duro químico (Ensaio 1)



Fonte: Autoria própria (2025)

Média Coef. de atrito (Ensaio 1): 0,58

Figura 39 - Coeficiente de atrito em superfície 7075-T6 revestida com níquel duro químico (Ensaio 2)



Fonte: Autoria própria (2025)

Média Coef. de atrito (Ensaio 2): 0,54

Os ensaios realizados em amostras submetidas aos processos de nitretação a plasma observou-se os mais elevados resultados no coeficiente de atrito em relação as demais superfícies analisadas. Esse pior resultado está associado aos piores resultados apresentados nos ensaios de dureza, atrito e se relaciona com a remoção de material realizada durante a aplicação do ensaio. Nas amostras submetidas aos processos de anodização e revestimento com níquel, as quais apresentaram ganhos na dureza superficial comparadas ao seu substrato, observou-se um aumento no coeficiente de atrito durante o período inicial do teste, inferior a 20 metros percorridos. Após a parcial estabilização o aumento persiste, mas em escala muito inferior.

Segundo Niksefat, V. e Mahboubi, F. (2024), esse aumento pode ser atribuído à expansão da distância de deslizamento, que leva a uma superfície de contato mais excelente entre o pino e o revestimento. Consequentemente, à medida que as forças de atrito atuam, detritos duros são gerados na pista de desgaste pela aspereza do corte, contribuindo para o aumento observado no coeficiente de atrito.

Nas amostras revestidas de níquel duro, com aproximadamente 80 metros percorridos, houve decréscimos nos coeficientes de atrito, provavelmente ocorridos pela remoção total do revestimento e início do desgaste no substrato.

APÊNDICE C - CÁLCULO DO VOLUME DE MATERIAL REMOVIDO

Dados para cálculo do volume de material removido (VMR), obtidos através da análise da pista de desgaste com a utilização do perfilômetro CV-2100. Segem dados referente as áreas obtidas através da análise das pistas de desgaste, Tabela 14 e cálculo do volume de material removido, Tabela 15.

Tabela 14 - Áreas obtidas através da análise das pistas de desgaste

Amostra	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Médias
7075-T6 (Ensaio 1)	0,036	0,029	0,061	0,059	0,046
7075-T6 (Ensaio 2)	0,050	0,031	0,030	0,051	0,041
7075-T6 (Ensaio 3)	0,044	0,028	0,015	0,033	0,030
7075-T6 (Ensaio 4)	0,034	0,028	0,021	0,016	0,025
Níquel (Ensaio 1)	0,018	0,013	0,018	0,019	0,017
Níquel (Ensaio 2)	0,013	0,016	0,013	0,010	0,013
Níquel (Ensaio 3)	0,021	0,017	0,016	0,021	0,019
Níquel (Ensaio 4)	0,015	0,014	0,014	0,016	0,015
Nitretada (Ensaio 1)	0,062	0,042	0,024	0,059	0,047
Nitretada (Ensaio 2)	0,023	0,038	0,094	0,047	0,050
Nitretada (Ensaio 3)	0,032	0,026	0,060	0,081	0,050
Nitretada (Ensaio 4)	0,022	0,028	0,048	0,036	0,033
Anodizada (Ensaio 1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Anodizada (Ensaio 2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Anodizada (Ensaio 3)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Anodizada (Ensaio 4)	0,002	0,001	0,000	0,001	0,001

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 15 - Cálculo do volume de material removido

	Média 1	Média 2	Média 3	Média 4	Área da pista	VMR
7075-T6	0,046	0,041	0,030	0,025	0,035	1,333
Anodização dura	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000
Níquel duro	0,017	0,013	0,019	0,019	0,017	0,635
Nitretação a plasma	0,047	0,050	0,050	0,033	0,045	1,697

Fonte: Autoria própria (2025)