



UNIVERSIDADE
FEDERAL DO PIAUÍ

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA



FAPEPI
FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA
DO ESTADO DO PIAUÍ



**ANAIS DA SEMANA DE ENGENHARIA
MECÂNICA 2023 UFPI**

Teresina-PI, 2023

DEPOSIÇÃO COM GAIOLA CATÓDICA DE TITÂNIO NO AÇO SAE 1080: COMPARAÇÃO ENTRE POTENCIAL CATÓDICO E FLUTUANTE

Lucas Pereira da Silva, lucassilvaeuro@hotmail.com¹

Brenda Jakellinny de Sousa Nolêto, brendajakellinny@gmail.com¹

Marcos Cristino de Sousa Brito, marcoscristino@ufpi.edu.br¹

Renan Matos Monção, renan.matos@ufpi.edu.br¹

Rômulo Ribeiro Magalhães de Sousa, romulorms@gmail.com^{1,2}

¹Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal do Piauí

²Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Piauí

Resumo: As amostras de aço carbono foram tratadas por meio da técnica da gaiola catódica, em duas condições diferentes, em potencial catódico e flutuante, com o propósito de estudar o efeito do isolamento elétrico das amostras nas propriedades do aço SAE 1080. A gaiola feita de titânio foi utilizada nos tratamentos. As amostras foram lixadas, polidas e limpas em banho ultrassônico antes de serem tratadas. Os tratamentos foram realizados na temperatura de 400°C com duração de 4 horas e um fluxo de gases de 75% N₂ e 25% H₂. As amostras foram caracterizadas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), teste de microdureza Vickers e ensaio de rugosidade. As imagens de microscopia (MEV) foram obtidas através de elétrons secundários usando um detector Everhart-Thornley. Teste de microdureza Vickers foram realizados com carga de 25gf com 5 indentações em cada amostra. Nos ensaios de rugosidade foram realizados com comprimento de avaliação de 12,5mm e comprimento de amostragem de 2,5mm, sendo feitos 4 ensaios em cada amostra. As amostras tratadas em potencial flutuante apresentaram uma superfície mais lisa e homogênea, com tendência a possuir uma superfície menos rugosa, que pode ser observado tanto no MEV quanto ensaio de rugosidade, no entanto, as amostras tratadas em potencial catódico apresentaram maior dureza superficial, com microdureza 97,20% maior que o tratamento em potencial flutuante.

Palavras-chave: Deposição, Duplex, Gaiola Catódica.

1 INTRODUÇÃO

Na nitretação a plasma os átomos são dissociados, ionizados e transportados para a superfície do material, formando uma camada característica advinda da difusão do nitrogênio, dessa maneira, a superfície do material é modificada (BORGES et al., 2019). Mesmo sendo um procedimento vantajoso, apresenta desvantagens como abertura de arcos, efeito cátodo oco, variações de temperatura, em especial em peças de formato complexo (FERNANDES et al., 2019).

A fim de corrigir tais efeitos, dispostos, foram desenvolvidos meios tais como envolver as amostras por uma gaiola e submetê-la a um elevado potencial catódico. Esse mecanismo é chamado de Cathodic Cage Plasma Nitriding (CCPN), no qual o plasma é formado não sobre a superfície da amostra, mas na gaiola, que funciona como cátodo. A gaiola catódica consiste em uma chapa cilíndrica vazada com furos de mesmo diâmetro e uma tampa circular também com furos similares, ambas do mesmo material que será depositado na amostra (FERNANDES et al., 2018).

No processo de deposição por gaiola catódica as amostras a serem tratadas são posicionadas sobre um disco de alumina, dentro da gaiola, permanecendo em potencial flutuante. O plasma é formado na gaiola catódica, tornando a amostra isenta de sputtering e, consequentemente de desvantagens como o efeito de borda e de cátodo oco (SOUSA et al., 2008). Além disso, outra forma de realizar a deposição é sem o disco de alumina, deixando a peça em contato direto com o cátodo. Essa configuração é conhecida como tratamento duplex simultâneo. Como a amostra está assumindo o potencial catódico, desvantagens da nitretação a plasma tornam-se presentes na amostra. No entanto, devido ao bombardeamento iônico, as amostras também são pulverizadas, fornecendo partículas para o plasma e possibilitando a formação de compostos distintos aos formados com o material originário da gaiola (NAEEM et al., 2021). Ademais, observa-se que o tratamento duplex simultâneo proporcionará uma transição mais suave entre a dureza da superfície e do substrato, contribuindo para uma melhor adesão do filme depositado.

Os tratamentos superficiais entram no contexto desse trabalho para melhorar as propriedades mecânicas do aço carbono SAE 1080. Foram utilizadas duas configurações de deposição, uma na qual a amostra está em potencial catódico e outra configuração na qual a amostra se encontra em potencial flutuante, a fim de verificar qual configuração traz uma melhor propriedade mecânica para o aço.

2 METODOLOGIA

Foram utilizadas amostras em formato quadrangular de aço SAE 1080 com aproximadamente 5mm de espessura e 20mm de comprimento, que foram cortadas em uma cortadeira metalográfica localizada no Laboratório de Metalografia do departamento de Engenharia Mecânica-UFPI. Após serem cortadas, as amostras foram lixadas em lixa d'água com granulometria 220, 400, 600 e 1200 MESH, respectivamente. Em seguida, foram polidas em alumina em suspensão em pano de polimento metalográfico. Posteriormente, passaram por um banho ultrassônico durante 5 minutos em álcool etílico, logo depois foram secas em ar quente com secador convencional, a fim de remover impurezas restantes nas superfícies das amostras.

Os tratamentos foram realizados em reator localizado no Laboratório de Plasma (LABPLASMA) no Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal do Piauí (UFPI). O reator possui uma fonte de corrente contínua de tensão máxima de 1200V e corrente máxima de 2A, que é responsável pelo fornecimento de energia para o aquecimento das amostras, por meio de uma diferença de potencial. Os tratamentos foram divididos em pré-sputtering e sputtering. O pré-sputtering tem a finalidade de remoção de impurezas remanescentes. Já o sputtering é o tratamento propriamente dito, que tem a finalidade de deposição dos filmes de TiN. As condições desses tratamentos são mostradas na Tabela 1.

Antes de cada tratamento a gaiola de titânio foi lixada para remover impurezas de tratamentos anteriores e limpa em banho ultrassônico de solução ácida de (50 ml HNO₃ + 3,25 ml HF + 4,25 ml H₂O) e posteriormente banho ultrassônico em álcool etílico durante 5 minutos, nessa ordem.

As amostras foram posicionadas no interior da gaiola, sendo que no tratamento de deposição as amostras foram postas sobre de um disco isolante, permanecendo assim em potencial flutuante, enquanto no tratamento duplex simultâneo as amostras são colocadas diretamente sobre o cátodo, assumindo assim seu potencial.

As micrografias foram realizadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) com canhão a emissão por campo, marca FEI, modelo Quanta FEG 250, com tensão de aceleração de 1 a 30 kV, equipado com EDS de SDD (Silicon drift detectors), marca Bruker, modelo Quantax EDS, detector XFlash 5010 localizados no LIMAV da Universidade Federal do Piauí (UFPI). Para a realização das micrografias de superfície topográficas, as amostras sem embutimento foram fixadas em substrato de alumínio (stub) utilizando fita adesiva dupla face de carbono.

Os ensaios de microdureza foram realizados com um microdurômetro da marca INSIZE modelo ISH-TDV 1000, com uma carga de 25gf aplicada durante 15 segundos, sendo realizadas 5 indentações em cada amostra.

O ensaio de rugosidade foi realizado com o auxílio de um rugosímetro portátil modelo SJ-210 da marca MITUTOYO, pertencente ao Laboratório de Usinagem. Foram executadas 3 medidas em cada amostra, com um comprimento de avaliação de 12,5 mm e um comprimento de amostragem de 2,5 mm.

Tabela 1. Condições de tratamento

	Pré-sputtering	Sputtering
Fluxo de gases	50%Ar/50%H ₂	75%N ₂ /25%H ₂
Temperatura (°C)	350	400
Tempo (h)	1	4
Pressão (Pa)	1,0x10 ²	2,0x10 ²

Figura 1: Representação esquemática do posicionamento das amostras nos tratamentos a) de deposição em potencial flutuante e b) duplex simultâneo. Fonte: Autoria Própria (2022).

2.1 Nomenclatura das amostras

Foram atribuídos códigos às amostras de acordo com suas técnicas, para facilitar a posterior discussão dos resultados. Os códigos das amostras estão especificados na Tabela 2.

Tabela 2. Código das amostras de SAE 1080 submetidas aos tratamentos.

Nomenclatura	Tipo de tratamento
ST	Sem tratamento
DCA	Deposição com alumina
TDS	Tratamento duplex simultâneo

3 RESULTADOS

3.1 Microdureza

Por meio da Figura 2 é possível perceber que houve aumento na dureza superficial das amostras tratadas em relação à amostra sem tratamento, que apresentou $301.29 \pm 20.22 \text{ HV}$. O aumento foi de 22,8 % para a amostra DCA e 142,5 % para a amostra TDS. Nota-se também que a amostra tratada em potencial flutuante apresentou uma barra de desvio padrão com baixa dispersão em torno da microdureza média, evidenciando a uniformidade da camada depositada, como uma vantagem do uso de gaiola catódica com o isolante, assim como Nishimoto et al (2013) apresentou em seu trabalho.

Já em relação ao tratamento duplex simultâneo é perceptível o aumento de dureza superficial da amostra em relação à amostra DCA. Isso se dá pela formação da intercâmara que é formada de forma simultânea ao processo de deposição do titânio, pois o gradiente de dureza influencia na análise da microdureza, como relatado por Ichimura et. Al. (2003). Além disso, pode-se notar também uma maior dispersão de valores nessa amostra, que pode ser explicado pelo efeito de borda, uma vez que a amostra estava em contato com o cátodo e não isolada como a amostra DCA (NAGATSUKA et. al., 2010).

Além disso, nota-se que as microdurezas ficaram abaixo dos valores apresentados na literatura para os revestimentos de TiN(>2300HV) (ZHANG; ZHU, 1993), uma vez que a identificação tem influência do substrato, uma vez que a camada depositada é muito fina, o que seria possível apenas no teste de nanodureza.

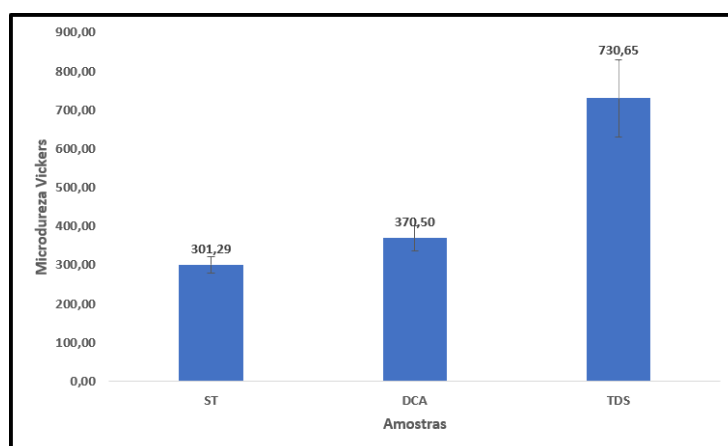


Figura 2. Microdureza das amostras de aço SAE 1080 com e sem tratamento. Fonte: Autoria Própria (2022).

3.2 Microscopia eletrônica de varredura das superfícies das amostras tratadas

Observa-se pela Figura 3 que houve o recobrimento total da superfície do substrato confirmando uma das vantagens do uso da gaiola catódica. A amostra DCA apresenta partículas menores e mais uniformes que a amostra TDS, dessa forma, o recobrimento com partículas menores acaba gerando durezas menores com o refinamento delas (GUIMARÃES, 2019). Ademais, o maior tamanho das partículas da amostra TDS pode ser explicada pelo contato direto com o porta amostra (cátodo), além do bombardeio iônico causado pela pulverização catódica (NAEEM et al., 2021).

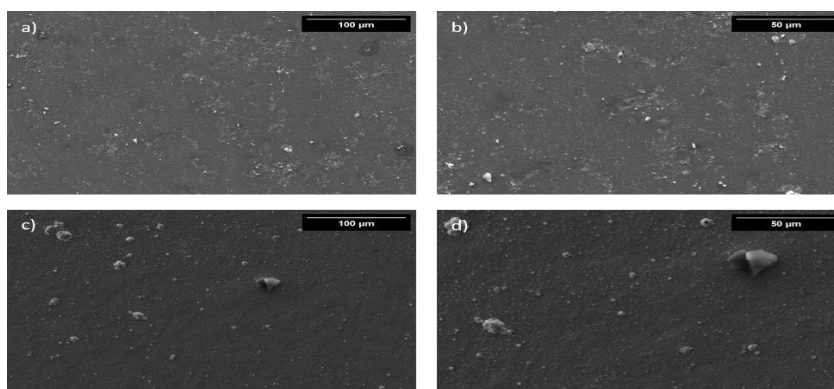


Figura 3. Microscopia eletrônica de varredura da superfície das amostras tratadas com gaiola catódica em potencial catódico e flutuante, a) e b) amostra DCA com escala de 100µm e 50µm, respectivamente, c) e d) amostra TDS com escala de 100µm e 50µm, respectivamente. Fonte: Autoria Própria (2022).

3.3 Rugosidade

Por meio da Figura 4, percebe-se que a amostra DCA apresenta o menor desvio padrão, pois nesse tratamento não há o bombardeamento iônico de espécies excitadas, o que possibilita uma maior homogeneidade de temperatura e menor rugosidade superficial pós-tratamento. Além disso, o valor nominal da rugosidade média da amostra TDS em relação à amostra ST, pode ser explicada através do efeito de borda, que é comum em tratamentos desse tipo, o que dificulta o

controle da homogeneidade e temperatura (NASCIMENTO, 2017). Ademais, esse valor nominal está de acordo com a Figura 3, no qual apresenta partículas maiores e mais amorfas do que a amostra TDS (CASTRO, 2017).

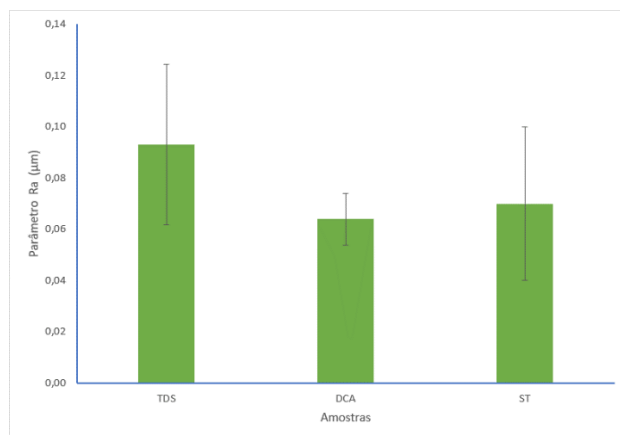


Figura 4: Parâmetro de rugosidade Ra das amostras de aço SAE 1080 com e sem tratamento. Fonte: Autoria Própria (2022).

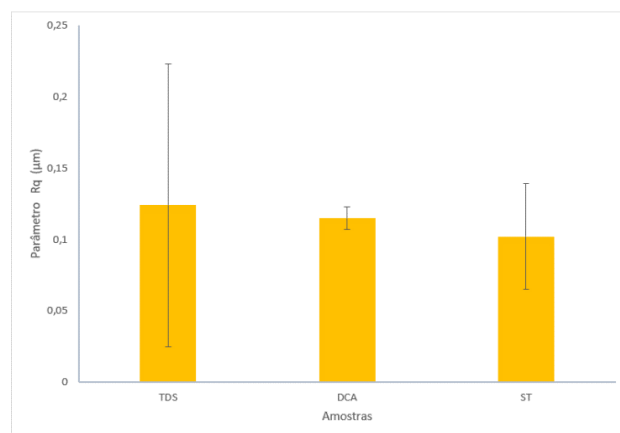


Figura 5: Parâmetro de rugosidade Rq das amostras de aço SAE 1080 com e sem tratamento. Fonte: Autoria Própria (2022).

3.4 EDS da superfície das amostras

Na figura 6 podemos ver o surgimento de picos de titânio e nitrogênio nas amostras DCA e TSD, o que nos indica que o filme de nitrato de titânio foi formado. Ademais, nota-se que o pico de nitrogênio ocorre em maior intensidade na amostra DCA do que na amostra TDS. Isso pode ser explicado devido a amostra DCA não apresentar difusão desse elemento para o interior do metal base, uma vez que está em potencial flutuante.

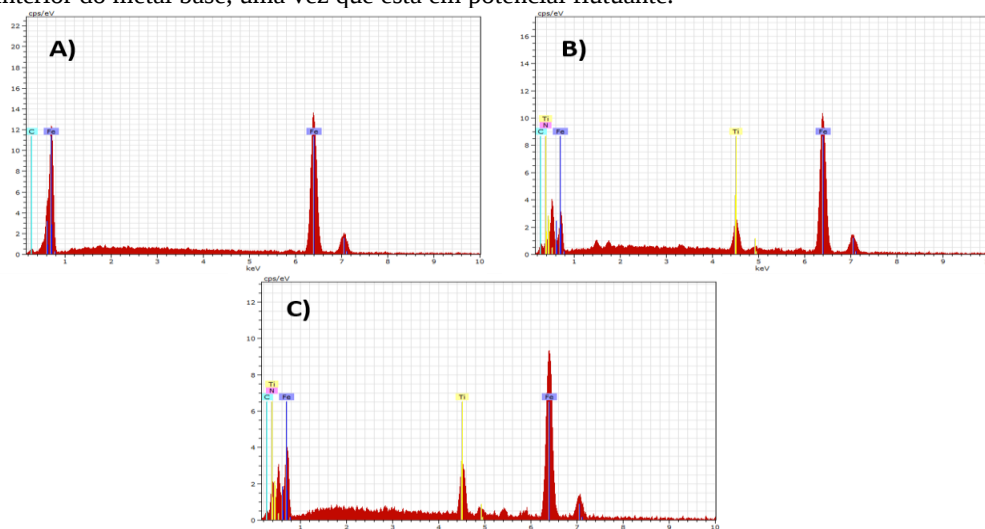
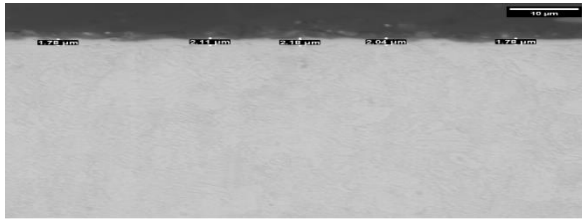
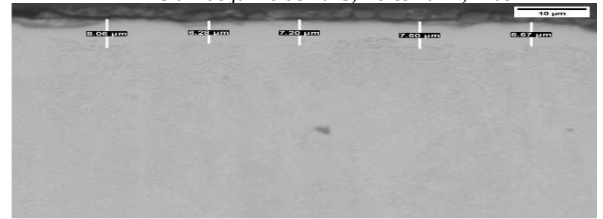


Figura 6: EDS das amostra ST, DCA e TDS, respectivamente.

3.5 MEV da seção transversal



1,97 ± 0,18



7,16 ± 0,71

4 CONCLUSÃO

- Ambos os tratamentos apresentaram elevação de microdureza na ordem de 22,8% e 142,5% para o tratamento de deposição e duplex simultâneo, respectivamente.
- Através dos ensaios de rugosidade e microscopia eletrônica de varredura, a amostra em potencial flutuante apresentou um revestimento mais uniforme em relação ao tratamento em potencial catódico.
- O tratamento em potencial flutuante apresentou grãos menores em relação ao tratamento em potencial catódico, o que pode ser visto através da microscopia eletrônica de varredura.
- No EDS foi possível ver a presença de picos de titânio e nitrogênio na amostra DCA e TSD, o que nos indica a formação de TiN.

5 REFERÊNCIAS

- BORGES, Ferdinando Marco Rodrigues et al. Nitretação a plasma da junta soldada do aço inoxidável super duplex SAF 2507. **Matéria** (Rio de Janeiro), [S.L.], v. 24, n. 1, p. 1-11, 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620190001.0642>.
- CASTRO, Ana Luiza de. **Avaliação da influência do fluxo total de nitrogênio e hidrogênio sobre as propriedades físicas dos filmes finos de nitreto de titânio depositados por plasma com uso de gaiola catódica**. 2017. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.
- ICHIMURA, H. et al. Hardness analysis of duplex coating. **Surface And Coatings Technology**, [S.L.], v. 169-170, p. 735-738, jun. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972\(03\)00131-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972(03)00131-2).
- FERNANDES, Fernanda de Melo et al. DEPOSIÇÃO DE FILMES FINOS DE COBRE POR GAIOLA CATÓDICA: análise do confinamento do plasma em função do aumento da espessura da tampa da gaiola catódica. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, [S.L.], v. 15, n. 3, p. 296-302, 2018. Editora Cubo. <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.1261>.
- FERNANDES, Fernanda M. et al. Deposition of fine copper film on samples placed internally and externally to the cathodic cage. **International Journal Of Materials Research**, [S.L.], v. 110, n. 3, p. 275-280, 25 fev. 2019. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.3139/146.111737>.
- GUIMARÃES, Franklyn Erikson da Silva. Deposição de TiCN e tratamento duplex simultâneo através do uso de gaiola catódica: estudo comparativo. 2018. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais da Universidade Federal do Piauí, Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2018.
- NAEEM, M. et al. Synthesis of molybdenum oxide on AISI-316 steel using cathodic cage plasma deposition at cathodic and floating potential. **Surface And Coatings Technology**, [S.L.], v. 406, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126650>.
- NAGATSUKA, Kimiaki et al. Surface hardening of duplex stainless steel by low temperature active screen plasma nitriding. **Surface And Coatings Technology**, [S.L.], v. 205, p. S295-S299, dez. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.08.012>.
- NASCIMENTO, Igor Oliveira. **Caracterização do efeito da corrente e temperatura na estequiometria dos filmes finos de TiN depositados por Gaiola Catódica e Magnetron Sputtering**. 2017. 127 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.
- NISHIMOTO, Akio et al. Simultaneous duplex process of TiN coating and nitriding by active screen plasma nitriding. **Surface And Coatings Technology**, [S.L.], v. 228, p. S558-S562, ago. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.04.021>.
- SERRA, Pettesonlinniker Carvalho; BARROS NETO, João Rodrigues de; FURTADO, André Sales Aguiar; SAMPAIO, Wesley Rick Viana; FEITOR, Michelle Cequeira; COSTA0, Thercio Henrique de Carvalho; SOUSA, Rômulo Ribeiro Magalhães de. Estudo de nitretação a plasma e tratamento duplex em brocas de aço rápido. **Matéria** (Rio de Janeiro), [S.L.], v. 25, n. 2, p. 1-15, nov. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200002.1072>.
- SOUSA, R.M. et al. Nitretação em gaiola catódica: influência do tempo de tratamento. **Matéria** (Rio de Janeiro), [S.L.], v. 13, n. 1, p. 119-124, mar. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-70762008000100014>.
- ZHANG, Shanyong; ZHU, Weiguang. TiN coating of tool steels: a review. **Journal Of Materials Processing Technology**, [S.L.], v. 39, n. 1-2, p. 165-177, out. 1993. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136\(93\)90016-y](http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136(93)90016-y).

6 RESPONSABILIDADE AUTORAL

Silva L.P., Nolêto B.J.S., Brito M.C.S., Monção R.M., e Sousa, R.R.M.

Deposição com gaiola catódica de titânio no aço SAE 1080: comparação entre potencial catódico e flutuante

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

MODELAGEM COMPUTACIONAL DE PILAR UTILIZANDO O SOFTWARE ANSYS

Ramon Macêdo de Moura, ramonmacedo@ufpi.edu.br¹
Eduardo Martins Fontes do Rêgo, e_eduardofontes@ufpi.edu.br¹

¹Universidade Federal do Piauí – UFPI

Resumo: Os pilares, na grande maioria dos casos, recebem esforços verticais, oriundos, principalmente, de vigas e lajes que neles se apoiam para descarregar seus esforços. O problema da flambagem, encurvamento do pilar quando submetido a determinadas cargas, apresenta-se como um dos mais conhecidos nessa área de estudo. O conhecimento do valor numérico da máxima carga que um pilar pode suportar sem apresentar flambagem, denominada carga crítica de flambagem torna-se de extrema importância para o dimensionamento assertivo desses elementos estruturais. O presente estudo buscou analisar o comportamento dos primeiros modos de flambagem, bem como a determinação de suas respectivas cargas críticas para colunas com diferentes condições de contorno. Os modelos de pilar estudados possuíam dois tipos de geometria: uma simples, com seção constante e outra mais complexa, com seção variável. Para a primeira geometria de coluna, foi analisada a carga crítica correspondente ao primeiro modo de flambagem das condições biapoiada, engastada e livre, engastada e apoiada e biengastada. Para a segunda geometria, de seção variável, foi estudado o carregamento crítico, referente ao primeiro modo de flambagem, da condição engastada e livre da coluna e comparado seu valor com o valor associado ao pilar de geometria simples, obtendo uma diferença percentual de 19,0405% entre os dois modelos, com a finalidade de verificar se as duas estruturas podem ser tratadas como similares no quesito de apresentarem flambagem. Para tanto, como ferramenta utilizada para confecção dos modelos computacionais, foi usado o software de elementos finitos Ansys, com foco na análise estática estrutural.

Palavras-chave: Pilar, Flambagem, Modelagem computacional, Ansys.

1 INTRODUÇÃO

No presente estudo, foi realizada a modelagem e análise de dois tipos de pilares, um de seção constante e outro de seção variável. Para o pilar de seção constante, foi determinada o valor numérico da carga crítica relativo ao primeiro modo de flambagem das principais condições de contorno presentes em literaturas como (Hibbeler, 2010 a) e (Gere, 2009a). Contudo, para o pilar de seção variável, apenas uma das condições de contorno foi analisada, a condição engastada e livre. Os modelos estudados foram reproduzidas com auxílio do *software* Ansys. O programa utiliza a metodologia do Método dos Elementos Finitos (MEF) cuja formulação consiste em substituir uma integral existente sobre um domínio complexo, por uma soma de outras integrais definidas em subdomínio de geometria mais simples. Se for factível o cálculo das integrais nos subdomínios, sua soma corresponderá a integral definida a todo o domínio (Azevedo, 2003). Em outras palavras, este método consiste em restringir uma estrutura a um determinado domínio, constituído de certa quantidade de elementos, analisando o comportamento existente em cada um dos finitos elementos que formam e caracterizam aquela estrutura. Devido a simplificação nas condições de contorno, foi dada ênfase ao modelo de pilar engastado e livre, inclusive, com a realização de um teste de convergência de malha e com a comparação entre o modelo simplificado, com seção constante, e o modelo real, com seção variável. A comparação no valor da carga crítica entre os dois modelos foi realizada para verificar se as duas estruturas podem ser consideradas similares no que diz respeito ao efeito da flambagem.

2 CARGA CRÍTICA DE FLAMBAGEM

A carga crítica de flambagem apresenta-se como a carga axial máxima que uma coluna pode suportar quando está na iminência de apresentar flambagem (Hibbeler, 2010 b).

Nas teorias estudadas, o enfoque do estudo da flambagem foi dado às colunas ideais que segundo (Hibbeler, 2010 c) são perfeitamente retas antes da aplicação da carga, feitas de material homogêneo e na qual a carga é aplicada no centróide da seção transversal. Vale ressaltar ainda que, essas condições de idealização de uma estrutura jamais são cumpridas, entretanto, são sempre utilizadas devido sua semelhança com análises mais reais e também por conta da sua simplicidade.

O grande matemático Leonhard Euler foi a primeira pessoa a estudar a flambagem de uma coluna esbelta e estabelecer o seu valor de carregamento crítico (Gere, 2009 b). A fórmula de Euler, indicada pela Eq. (1), é a expressão analítica que serve de parâmetro para comparar os resultados obtidos mediante outras técnicas como as experimentais e os modelos computacionais.

A flambagem de uma coluna biapoiada, ou seja, com as extremidades inferior e superior apoiadas por pinos, é considerada o caso mais típico de flambagem (Gere, 2009 c). Entretanto, na prática, outras condições de apoio são encontradas. Variações na fórmula de Euler possibilitam a determinação via solução analítica e posterior comparação com outras soluções.

A diferença de restrição dos graus de liberdade entre os apoios é o que diferencia uma estrutura da outra. Uma coluna biapoiada, analisada no plano, por exemplo, possui em sua base restrição de deslocamento em duas direções e no seu topo restrição de deslocamento em uma direção, a estrutura é livre para girar. Uma coluna engastada e livre é caracterizada por possuir base restringida quanto aos deslocamentos em ambas as direções, sendo a rotação também impedida. Seu topo não apresenta nenhum tipo de restrição. As colunas biengastadas apresentam todos os graus de liberdade restringidos, com exceção do deslocamento ao longo do eixo longitudinal no engaste superior, que é permitido. Por fim, a configuração engastada e apoiada possui na base todos os graus de liberdade restringidos, enquanto no topo a restrição é feita no deslocamento em uma das direções. Para uma análise estrutural em três dimensões, objeto do nosso estudo, a restrição dos graus torna-se mais dificultosa.

Autores como (Hibbeler, 2010 d) e (Gere, 2009 d) apresentam em suas obras as expressões dos carregamentos críticos, comprimentos efetivos e fatores de comprimentos efetivos para colunas ideais. A Fig. 1, extraída de (Gere, 2009 e), apresenta essas informações associadas a quatro condições de contorno distintas.

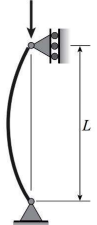
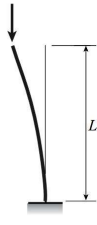
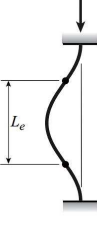
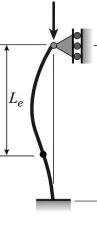
(a) Coluna apoiada por pinos em ambas as extremidades	(b) Coluna engastada livre	(c) Coluna engastada em ambas as extremidades	(d) Coluna engastada apoiada por pinos
$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$	$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2}$	$P_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{L^2}$	$P_{cr} = \frac{2,046 \pi^2 EI}{L^2}$
			
$L_e = L$	$L_e = 2L$	$L_e = 0,5L$	$L_e = 0,699L$
$K = 1$	$K = 2$	$K = 0,5$	$K = 0,699$

Figura 1. Carregamentos críticos, comprimentos efetivos e fatores de comprimentos efetivos para colunas ideais (Gere, 2009 e).

A expressão geral para a carga crítica de flambagem, em função do fator de comprimento efetivo do pilar, é dada por:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (1)$$

onde: P_{cr} é o carregamento crítico, E é o módulo de elasticidade do material, I é o momento de inércia da seção, K o fator de comprimento efetivo e L o comprimento do elemento estrutural.

3 METODOLOGIA

Arelado a revisão de literatura sobre colunas e seus modos de flambagem, foram desenvolvidos modelos no *software* Ansys para comprovar os resultados obtidos via soluções analíticas. O foco principal foi dado às condições da malha utilizada no processamento dos modelos bem como na definição das condições de contorno que, por se tratar de um modelo tridimensional, exigiu um maior cuidado na definição das restrições dos graus de liberdade para cada um dos casos analisados. As ferramentas usadas no *software* Ansys para definição das condições de contorno e posterior processamento dos resultados foram a *Static Structural* e a *Eigenvalue Buckling*, respectivamente, análise estática estrutural e flambagem de autovalor.

O conhecimento da interface visual do *software* foi de extrema importância para garantir a familiaridade com o programa. Ademais, foi realizada a modelagem de diversas estruturas, com a finalidade de extrair informações como deslocamentos e tensões máximas. Para confirmação dos resultados obtidos com a modelagem computacional, alguns exercícios presentes em livros da resistência dos materiais, como (Gere, 2009 f) e (Hibbeler, 2010 e), foram executados via *software*, além de exemplos de autoria própria, com resolução analítica de fácil confecção, que também foram utilizados com a finalidade de comprovar a convergência entre os modelos computacionais e analíticos.

O primeiro pilar analisado foi o de geometria simples, com seção constante, confeccionado com seção retangular de 20 x 20 cm e altura de 3 metros. O material escolhido foi o aço estrutural, com módulo de elasticidade equivalente a 200 GPa, coeficiente de Poisson igual a 0,30, sendo um material isotrópico e linear elástico. Neste modelo, para cada uma das quatro principais condições de apoio presentes em literaturas como (Hibbeler, 2010 f) e (Gere, 2009 g); pinada-pinada,

engastada-livre, engastada-pinada e engastada-engastada; foi determinada a carga crítica correspondente ao primeiro modo de flambagem da estrutura. Outros modos de flambagem não foram analisados, já que o colapso da estrutura ocorre assim que a carga correspondente ao primeiro modo é atingida. Em todos os casos realizou-se a aplicação de uma carga de 1 kN no centróide da seção transversal do elemento.

O segundo pilar analisado corresponde ao de geometria mais complexa, apresentando seção variável, baseou-se nos pilares dos experimentos de (Melo, 2009), na qual ensaiou 24 pilares de concreto armado submetidos a flexo-compressão normal (Rocha, 2022). A representação bidimensional do pilar de seção variável com cotas em metros e sem fator de escala é mostrada na Fig. 2.

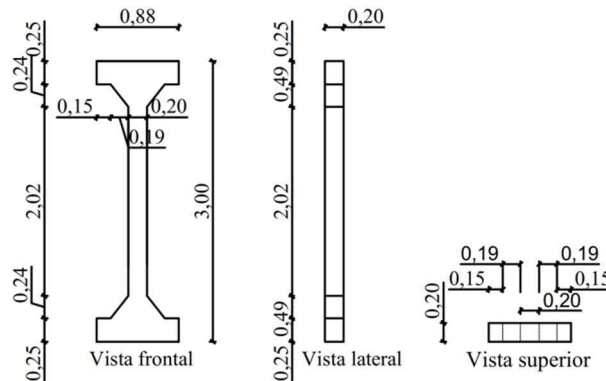


Figura 2. Representação bidimensional do pilar de seção variável (O Autor, 2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a condição engastada e livre, devido sua simplificação nas condições de apoio, foi desenvolvido um teste de convergência de malha com resultados mostrados no quadro 1.

Coluna engastada e livre			
Lado da malha (m)	Multiplicador de carga	Carregamento crítico (kN)	Erro relativo (%)
0,20	7380,50	7.380,50	0,9531
0,19	7329,70	7.329,70	0,2583
0,17	7352,10	7.352,10	0,5647
0,16	7329,50	7.329,50	0,2555
0,15	7351,00	7.351,00	0,5496
0,14	7349,60	7.349,60	0,5305
0,13	7348,70	7.348,70	0,5182
0,12	7348,30	7.348,30	0,5127
0,11	7347,10	7.347,10	0,4963
0,10	7346,50	7.346,50	0,4881
0,09	7343,60	7.343,60	0,4484
0,08	7343,40	7.343,40	0,4457
0,07	7340,40	7.340,40	0,4046
0,06	7335,40	7.335,40	0,3362
0,05	7334,60	7.334,60	0,3253
0,04	7327,80	7.327,80	0,2323
0,03	7326,10	7.326,10	0,2090
0,02	7311,80	7.311,80	0,0134
0,01	Excedido	---	---

Quadro 1. Teste de convergência de malha (O Autor, 2023).

Percebe-se nesta análise que o erro relativo no valor da carga crítica, para todos os casos de malha, ficou abaixo de 1% em comparação com a solução analítica. Para todos os modelos analisados neste estudo, adotou-se um tamanho de malha variado entre 50 e 20 mm, isso se fez devido algumas limitações encontradas no que concerne ao processamento dos dados.

4.1 Pilar de Seção Constante Engastado na Base e Livre no Topo

Para simulação da condição engastada e livre, foi adicionado um suporte fixo na face indicada por B, restringindo todos os deslocamentos e rotações possíveis. Além disso, para a não ocorrência de modos de torção, o deslocamento na direção z foi restringido na face indicada por C. Para este caso, a malha usada foi de 20 mm de lado. A geometria da coluna e suas condições de contorno, modeladas no programa, são mostradas, sem escala na Fig. 3.

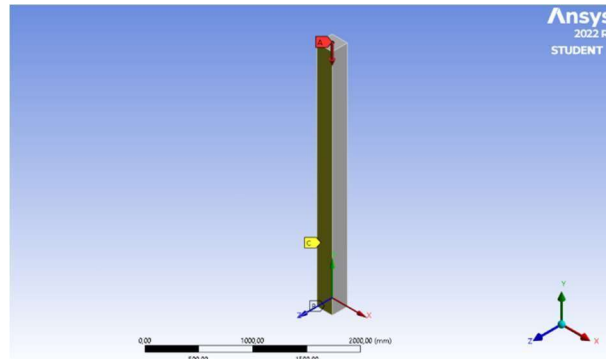


Figura 3. Geometria e condições de contorno do pilar de seção constante engastado e livre (O Autor, 2023).

Os resultados obtidos com esse modelo estão apresentados no quadro 2.

Pilar com uma extremidade engastada e a outra livre		
Resultado	Carregamento crítico (kN)	Erro relativo (%)
Analítico	7.310,82	0,0134
Ansyes	7.311,80	

Quadro 2. Resultados do modelo com seção constante engastado e livre (O Autor, 2023).

4.2 Pilar de Seção Variável Engastado na Base e Livre no Topo

Para a inserção desse modelo e suas condições de apoio no *software* foi inserido, na face indicada pela letra B, um suporte fixo, restringindo todos os graus de liberdade possíveis naquela região. Na face indicada pela letra C, foi restringido o deslocamento na direção do eixo x, para conter possíveis modos de torção na estrutura. A aplicação da carga, no valor de 1 kN, ocorreu no centroide da seção transversal do pilar. A malha da estrutura foi definida com lado de 20 mm. A geometria e as condições de contorno na interface do *software* sem consideração de escala são mostradas na Fig.4.

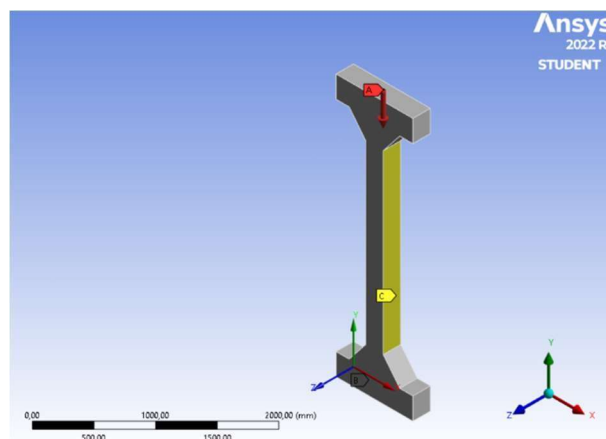


Figura 4. Geometria e condições de contorno do pilar de seção variável engastado e livre (O Autor, 2023)

Os resultados desse modelo foram comparados com os do modelo simplificado (seção constante) e mostrados no quadro 3.

Comparação seção variável x seção constante		
Tipo de seção	Carregamento crítico (kN)	Varição percentual (%)
Constante	7.311,8000	19,0405
Variável	8.704,0000	

Quadro 3. Resultados e comparativo entre as seções de pilar constante e variável (O Autor, 2023).

5 CONCLUSÕES

Dessa forma, observa-se que o pilar de seção variável sofreu um aumento de 19,0405% no valor da carga crítica referente ao primeiro modo de flambagem, em comparação com o modelo simplificado de seção constante, também analisado nesse estudo, ou seja, as duas estruturas, para efeitos de flambagem, não devem ser tratadas como similares, visto a grande diferença percentual no valor numérico da carga crítica encontrada.

6 REFERÊNCIAS

- Azevedo, A. F. M. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS, 1ª Edição, 2003.
- Gere, J. M. & GOODNO, B. J. Mecânica dos Materiais, 7ª Edição, 2009.
- Hibbeler R. C. Resistência dos Materiais, 7ª Edição, São Paulo: Pearson, 2010.
- Rocha, J.L.D.S. ANÁLISE NUMÉRICA DE PILAR E PILAR PAREDE: CARGA DE RUPTURA, DESLOCAMENTO, DEFORMAÇÃO E TENSÃO NO ESTRIBO. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em engenharia civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2022.
- Rocha, J.L.D.S. RELATÓRIOS DE ATIVIDADES – PRAGRAMAS DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFPI. Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2021.

7 RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

MODELAGEM COMPUTACIONAL DE VIGAS UTILIZANDO O SOFTWARE ANSYS

Sonnyard Levy Silva Araújo, sonnylevy@ufpi.edu.br¹
Eduardo Martins Fontes do Rêgo, e_eduardofontes@ufpi.edu.br¹

¹Universidade Federal do Piauí - UFPI

Resumo: Vigas são elementos em que a flexão e cortante são preponderantes, podendo ser de seção transversal constante ou variável. O acúmulo dos esforços máximos presentes em vigas pode ser determinado por métodos experimentais ou por métodos avançados de análise, incluindo o método de elementos finitos (MEF). ANSYS é um dos diversos programas comerciais que utilizam o MEF e tem ampla utilização nos diferentes ramos da engenharia, a sua correta utilização deve produzir correspondência a estudos precedentes. Desta forma, utilizou-se o ANSYS para criar modelos baseados em estruturas presentes na bibliografia analisada e verificar a correspondência de resultados, por meio do tamanho da malha definido pela melhor relação entre maior precisão com menor custo computacional. Analisou-se a deformação direcional, para viga variando em mísula, e tensões existentes, em viga de seção constante formada por dois materiais. O erro relativo percentual máximo encontrado foi igual a 0,25%, representando correspondência entre a modelagem realizada no software ANSYS e solução analítica presente na bibliografia utilizada no estudo.

Palavras-chave: Vigas, Mísula, Elementos Finitos, ANSYS

1 INTRODUÇÃO

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), vigas são elementos lineares nos quais o comprimento longitudinal é maior que pelo menos três vezes a maior dimensão da seção transversal, em que a flexão e cortante são preponderantes e apresentam como função principal transmitir aos pilares as cargas das lajes e dos carregamentos aplicados diretamente na própria viga.

As deformações decorrentes da flexão provocam a rotação das seções transversais, de modo que as fibras longitudinais do lado convexo da viga sejam alongadas e as do lado côncavo encurtadas (Timoshenko, 1982). A primeira, sob tensão de tração, e a segunda, sob tensão de compressão, além de possuir uma superfície neutra, onde as fibras longitudinais não apresentam variação no comprimento.

As vigas podem ser de seção transversal constante ou variável. Vigas prismáticas possuem seção uniforme, por consequência, apresentam um único momento de inércia ao longo do seu comprimento. Já as vigas de seção transversal variável ocorrem quando apresentam variação na altura ao longo do seu vão, ou seja, há um momento de inércia máximo e mínimo, podendo formar trapézios ou curvas parabólicas. Tal formato permite reduzir os esforços atuantes sem aumento excessivo das ações relacionadas ao próprio peso, à medida que utiliza menos quantidade de material, fato de extrema importância à construção de elementos com melhor otimização e menor custo. Desta forma, vigas com seção variável são geralmente utilizadas em estruturas com grandes vãos, como viadutos e pontes, normalmente na forma de pré-moldados.

A união de dois materiais diferentes define as vigas de concreto armado. A alta resistência à compressão do concreto, unida à alta resistência à tração do aço justificam o uso associado, além de ser assegurado por propriedades de aderência e dilatação. Materiais diferentes ligados de modo a atuarem como um, por via de regra, são projetados ponderando a resistência mecânica aliada a redução de custos, à proporção que os elementos de maior resistência e custo podem ser empregados nas regiões de maior solicitação. Ao aumentar o momento de inércia da seção, de maneira variável, há uma redistribuição de momentos, gerando um acúmulo dos esforços máximos no local de maior rigidez. Assim, a disposição das barras de aço pode minimizar o impacto da baixa resistência do concreto à tração, garantindo a resistência mecânica da viga.

O presente estudo tem como objetivo principal a elaboração e análise de modelos de vigas utilizando o software de elementos finitos ANSYS, uma ferramenta avançada de Engenharia Auxiliada por Computadores (CAE). Nesse sentido, serão considerados estudos prévios que estabelecem e avaliam as tensões, deformações específicas e deformações totais que ocorrem na estrutura quando submetida a diferentes tipos de carregamento. Através dessa análise detalhada, busca-se compreender o comportamento estrutural das vigas, identificando pontos críticos e fornecendo informações relevantes para a otimização do projeto e a garantia de sua eficiência e segurança.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A princípio, consultou-se bibliografia relativa à análise de elementos estruturais sujeitos a diferentes tipos de carregamento, de forma a compreender seu comportamento e obter modelos utilizados com frequência na engenharia. Em seus estudos, Timoshenko e Gere (1982) consideram barras carregadas axialmente, eixos, vigas e colunas com o objetivo de determinar as tensões e deformações produzidas pelas cargas até seu ponto de fratura.

Posteriormente, em novo trabalho, Gere (2010) teve grande êxito ao definir a concentração de tensões como fator extremamente importante para a resistência e utilização de um material. Amplificadores de tensão consistem em mudanças abruptas na geometria que geram uma perturbação no padrão uniforme de tensão, fato comum a vigas não prismáticas, as quais apresentam uma variação de seção ao longo de parte do seu comprimento, o que gera uma reorganização de momentos e tensões atuantes.

Para estruturas com inércia variando em mísula, Süsskind (1980) apresenta uma série de quadros definindo coeficientes necessários à obtenção de deformações provocadas por carregamentos usuais, as quais levam em consideração quatro tipos de mísulas, sendo elas reta assimétrica, parabólica assimétrica, reta simétrica e parabólica simétrica. Fator de grande importância no presente estudo, ao garantir a resolução teórica dos elementos modelados de maneira prática.

Uma alternativa para análise de vigas é o método dos elementos finitos (MEF) que tem como objetivo a determinação de tensões e deformações de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações externas (Azevedo, 2003). O MEF é um dos principais exemplos de métodos numéricos de simulação computacional que consiste em discretizar o sistema analisado em vários elementos menores, resolvendo equações diferenciais finitas baseadas no método dos deslocamentos, em modelos de equilíbrio, ou em métodos híbridos e mistos. Quanto maior o número de elementos, maior a precisão e maior o custo computacional, podendo apenas aproximar a resposta do sistema físico real, que tem um número infinito de elementos.

3 METODOLOGIA

O ANSYS é um dos diversos programas comerciais que utilizam o MEF e tem ampla utilização no meio técnico científico, mostrando-se altamente confiável. A correta utilização de aparatos computacionais deve produzir correspondência a estudos precedentes. Assim, a metodologia presente no atual estudo é a conexão entre a pesquisa bibliográfica e a modelagem computacional.

A metodologia referente a criação dos modelos no ANSYS é baseada em estruturas utilizadas como exemplos de vigas com seção variando em mísula nos capítulos relacionados ao cálculo de deformações em estruturas isostáticas, no Süsskind (1980), e vigas com seção transversal uniforme de materiais diferentes presente no Timoshenko (1982). As quais apresentam materiais isotrópicos em regime linear elástico.

O elemento adotado para a discretizar a modelagem é o *SOLID186*, por ser um elemento sólido estrutural homogêneo de ordem superior que aceita malhas irregulares, permitindo trabalhar com carregamentos em diferentes direções. A malha é definida pela ferramenta Multizone Method e o tamanho da malha definido pela melhor relação entre maior precisão com menor custo computacional.

4 RESULTADOS

Modelos de fácil cálculo manual foram utilizados para comprovar a correta utilização do programa ANSYS. Ao identificar correspondência entre os valores obtidos pela solução analítica e resultado proveniente do programa, buscou-se modelos mais complexos presentes na bibliografia utilizada.

4.1 Viga de Seção Variando em Mísula

A análise de estruturas de inércia variando em mísula apresentada por Süsskind (1980) gerou o conhecimento dos coeficientes necessários ao cálculo das deformações. Desta forma, selecionou-se uma viga biapoiada que possui trechos definidos por mísula reta simétrica e mísula reta assimétrica para análise das deformações provocadas pelo carregamento, de acordo com a fig. 1. As características de cada seção transversal foram calculadas e apresentadas no quadro 01.

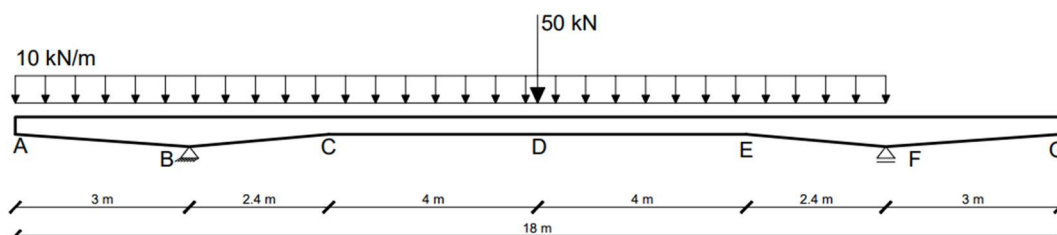


Figura 1. Viga com inércia variando em mísula (O Autor, 2023).

Seção	Inércia (m ⁴)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Rigidez Flexional (GPa)	Largura (m)
A, C, D, E e G	3,375.10 ⁻⁴	592,593	2.10 ⁵	0,15
B e F	1,6875.10 ⁻³	592,593	1.10 ⁶	0,15

Quadro 1. Características principais da viga (O Autor, 2023).

Em posse dos dados, iniciou-se a modelagem da estrutura no ANSYS. Conforme a fig. 2, para simular uma condição biapojada, a aresta indicada por B foi restringida aos deslocamentos e rotações em relação aos eixos x e y. Já na aresta A foi impedido o deslocamento em y. Na face indicada por C, foi restringido o deslocamento em z. As indicações E e D indicam carregamento uniformemente distribuído de 10 kN e concentrado de 50 kN, respectivamente.

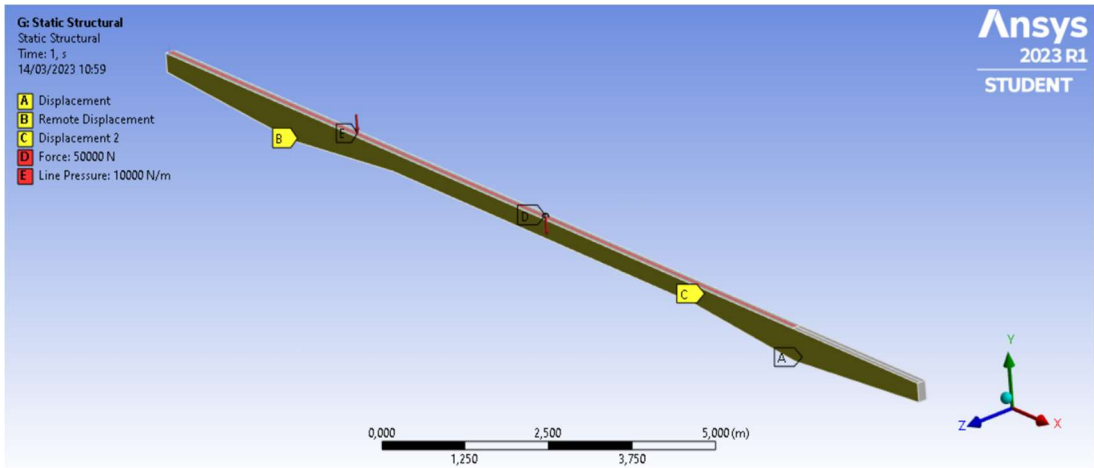


Figura 2. Modelo de viga com seção variável (O Autor, 2023).

Por meio da ferramenta *Static Structural*, que permite analisar estruturas em regime estático onde as forças externas formam um sistema equivalente nulo, buscou-se a deformação direcional no sentido do eixo y para a extremidade esquerda da estrutura.

Sabendo que o tamanho da malha é fundamental para a qualidade do resultado, realizou-se teste de convergência considerando lado de malha entre 0,5 e 0,03 metros. A figura 3 apresenta os resultados obtidos.

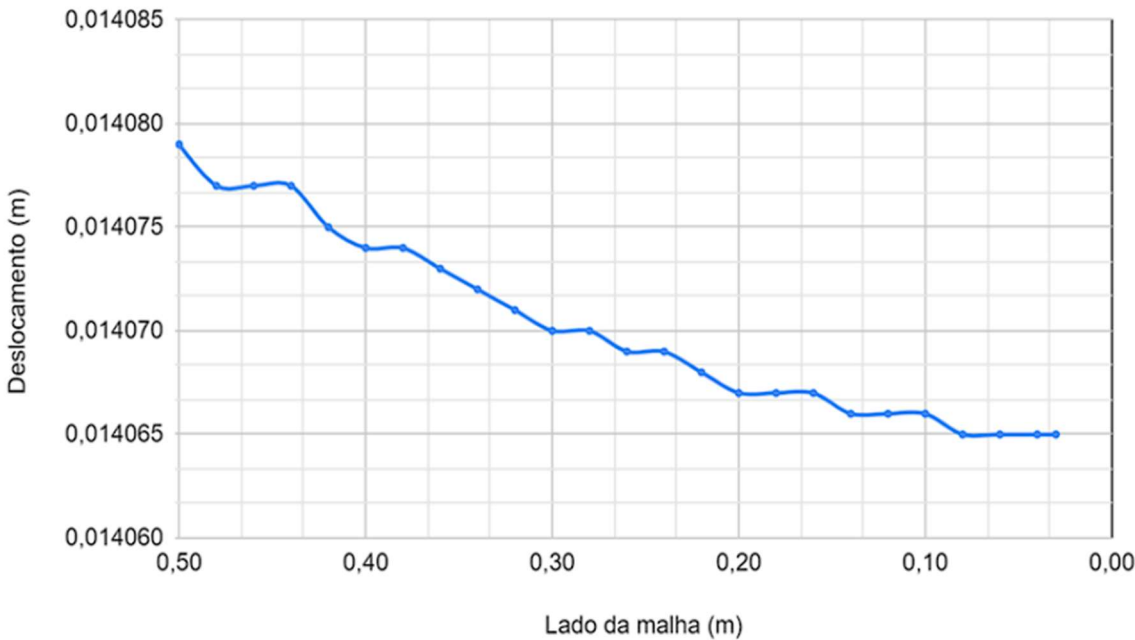


Figura 3. Gráfico do teste de convergência (O Autor, 2023).

Após a execução do teste de convergência obtemos o deslocamento no sentido do eixo y igual a 1,4065 cm, conforme a figura 4, representando um erro relativo de 0,071% em relação ao cálculo desenvolvido por Süsskind (1980).

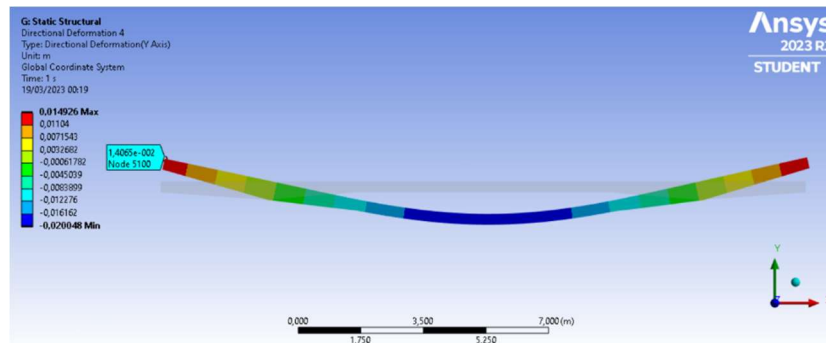


Figura 4. Deformação direcional na viga com mísula estrutural (O Autor, 2023).

4.2 Viga de Seção Constante com Dois Materiais

O exemplo de viga de seção constante está presente no estudo de Timoshenko (1982), o qual apresenta uma viga composta por dois materiais, sendo o primeiro com módulo de elasticidade igual a 7 GPa e o segundo igual a 140 GPa, além das condições de contorno e carregamento presentes na figura 5. A figura 6 exibe a seção transversal da viga.

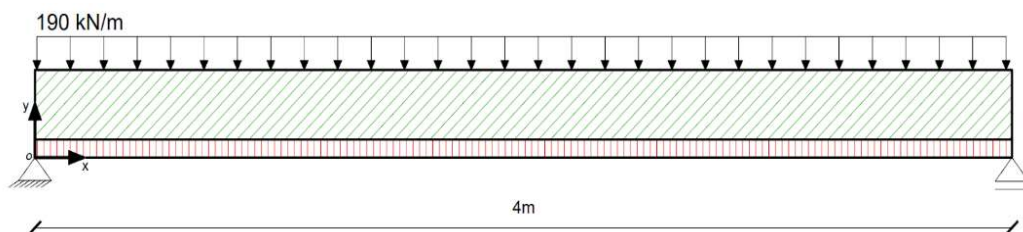


Figura 5. Condições de contorno e carregamento (O Autor, 2023).

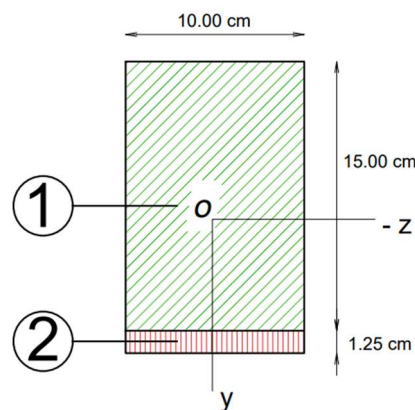


Figura 6. Adaptado de Timoshenko (1982).

No ANSYS, para simular uma viga biapoada, a aresta indicada por A foi restringida aos deslocamentos no sentido do eixo y. A aresta indicada por B foi restringida aos deslocamentos e rotações em relação aos eixos x e y. Já a face C foi impedida de se deslocar em z. Por fim, em D, aplicou-se o carregamento, conforme a figura 7.

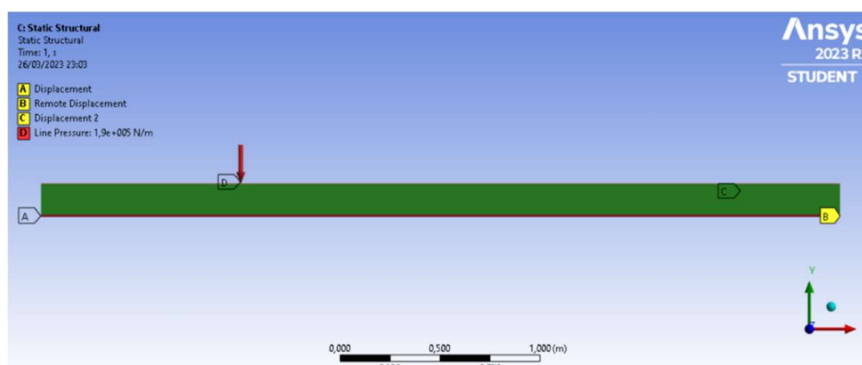


Figura 7. Modelagem no Ansys (O Autor, 2023).

Material	Lado da malha (m)	Tensões Máximas	Solução Analítica (MPa)	ANSYS (MPa)	Erro Relativo (%)
Material 1	0,05	Compressão	0,5286	0,5296	0,19
		Tração	0,1017	0,1017	0,00
Material 2		Compressão	2,0338	2,0341	0,01
		Tração	3,0844	3,0922	0,25

Quadro 2. Tensões totais na viga (O Autor, 2023).

A solução analítica desenvolvida por Timoshenko (1982) considerou as tensões máximas e mínimas nos dois materiais. O quadro 2 exibe o erro relativo referente à solução analítica desenvolvida por Timoshenko (1982). O maior erro relativo encontrado foi de 0,25%.

5 CONCLUSÃO

A análise da literatura disponível juntamente com a modelagem computacional no ANSYS proporcionou observar o comportamento estrutural discutido frequentemente na graduação de engenharia civil, de maneira clara e interativa, resultando no enriquecimento teórico e prático acerca da utilização do *software* de elementos finitos aplicado à engenharia. O erro relativo percentual em relação ao cálculo desenvolvido por Süsskind (1980) para a viga variando em mísula foi igual a 0,071%, já para a viga com materiais diferentes desenvolvida por Timoshenko (1982) ficou entre 0% e 0,25%. Desta forma, ao obter valores mínimos de erro relativo, confirmou-se a correta utilização do método dos elementos finitos, por meio do *software* ANSYS, junto a questões estruturais discutidas ao longo da graduação em engenharia.

6 REFERÊNCIAS

- ALVES, G. S. Implementação do método dos elementos finitos generalizados com aplicação em materiais compósitos. 2014. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto, 2014.
- AZEVEDO, A. F. M. Método dos elementos finitos. Porto: [S. I.], 2003.
- GERE, J.M.; GOODNO, B. J. Mecânica dos Materiais. 3. ed. São Paulo: *Cengage Learning*, 2010.
- NEVES JUNIOR, A. Sobre a modelagem de estruturas delgadas usando elementos finitos tridimensionais. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Departamento de Estruturas e Fundações, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- ROCHA, J.L.D.S. Análise numérica não linear de pilar e pilar-parede: carga de ruptura, deslocamento, deformação e tensão no estribo. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Departamento de Tecnologia, Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2023.
- SÜSSEKIND, J. C. Curso de análise estrutural: deformação em estruturas método das forças. Porto Alegre: Globo, 1980.
- TIMOSHENKO, S.P.; GERE, J.M. Mecânica dos sólidos. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1983.

7 RESPONSABILIDADE AUTORMAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ESTUDO DO DESGASTE DE FRESAS DE AÇO RÁPIDO NITRETADAS E COM TRATAMENTO DUPLEX NA USINAGEM DO AÇO SAE 1020

Marcus Vinicius da Silva Mendes, marcusvc54@gmail.com²

Patrick Abreu de Oliveira, patrick@ufpi.edu.br^{1,2}

Marcos Guilherme Carvalho Braulio Barbosa, marcosguilherme@ufpi.edu.br^{1,2}

¹ Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Piauí, Avenida Universitária, Teresina, Piauí, Brasil.

² Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal do Piauí, Avenida Universitária, Teresina, Piauí, Brasil.

Resumo: Ferramentas de corte mais duráveis têm grande contribuição na economia e rapidez dos processos de usinagem, visto a menor parada da produção para troca de ferramentas, maiores velocidades de corte e uma menor quantidade de ferramentas. Vários métodos de melhoria de ferramentas vêm sendo estudados e desenvolvidos, dentre eles tem grande destaque a nitretação a plasma em aços rápidos. Este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento de fresas de topo de aço rápido nitretadas em diferentes condições de temperatura e com tratamento duplex com deposição de TiN na usinagem do aço SAE 1020. Para o estudo do desempenho das ferramentas, utilizou-se microscopia para captura de imagens de desgaste em todas as etapas de usinagem e medição da corrente elétrica requisitada pelo Centro de Usinagem. Para o estudo da superfície usinada, utilizou-se metalografia e ensaio de microdureza. Os ensaios de usinagem foram feitos fixando os parâmetros $v_c = 20$ m/min e $a_p = 0,5$ mm. Notou-se que o mecanismo de abrasão influenciou fortemente no desgaste das ferramentas. A fresa nitretada a 450 °C foi a que apresentou melhor comportamento em relação às fresas nitretadas a 350 °C e 400 °C, sendo uma das que obteve menores valores de corrente elétrica e maior número de passes, maior remoção de material. A fresa com tratamento duplex não teve comportamento satisfatório em comparação com as nitretadas. Verificou-se maiores valores de microdureza nas regiões encruadas da superfície usinada em relação ao centro da peça.

Palavras-chave: Usinagem, Fresamento, Nitretação, Aço Rápido, Desgaste.

1 INTRODUÇÃO

O fresamento é um processo mecânico destinado à obtenção de quaisquer superfícies através da remoção de material por ferramentas rotativas, geralmente multicortantes, cujos dentes removem uma pequena quantidade de material em cada revolução (Ferraesi, 1977).

Os avanços, em grande parte, não ultrapassam o valor de 0,25 mm/dente. Mesmo os avanços sendo considerados leves, as taxas de remoção de material são altas devido à quantidade de dentes que a fresa possui (Shaw, 2005 e Trent, 2000).

Entre os vários tipos de ferramentas de corte utilizadas no mercado, estão as fresas de aço rápido – HSS. O aço rápido é amplamente utilizado na usinagem devido as qualidades que apresenta, como a dureza a quente, que segundo Chiaverini (2008) essa é a propriedade mais importante dos aços rápidos, que garante trabalhos na faixa de 550 °C a 600 °C.

Na procura por maior durabilidade dessas ferramentas, surgem os tratamentos termoquímicos superficiais, que garantem uma maior dureza e maior resistência ao desgaste, tendo como exemplo a nitretação a plasma. Também, aparecem nesse contexto os revestimentos, sendo um dos mais utilizados o nitreto de titânio TiN, que proporciona maior dureza, estabilidade térmica e resistência à abrasão (Bashir *et al.*, 2017). Klocke (2011) também diz que as propriedades dos aços rápidos relacionadas ao desgaste podem ser aprimoradas com tratamentos de superfície, como a nitretação, que é o enriquecimento da camada superficial com nitrogênio.

Por meio de variações de parâmetros como pressão, composição do gás e temperatura, é possível produzir diferentes estruturas de camada nitretada (Tier, 1998). Ainda de acordo com Tier (1998), na nitretação de um aço, duas zonas podem surgir na superfície da peça: a camada de compostos (mais externa e composta por nitretos de ferro) e a zona de difusão, onde o nitrogênio se encontra como átomos intersticiais ou como nitretos de liga finamente precipitados, sendo a espessura da zona de difusão dependente da temperatura, tempo de tratamento e do conteúdo de elementos de liga do aço.

No campo de estudo da usinagem há a análise de tempo de vida de ferramentas de corte, que estabelece a produtividade de uma ferramenta até que ela atinja um desgaste estipulado como critério de fim de vida, ou até que ela sofra fraturas que a torne inutilizável. Esse desgaste pode aparecer em vários tipos.

Segundo Childs *et al.* (2000), o desgaste de cratera pode reduzir muito a vida útil da ferramenta de corte por ação de deformação plástica ou fratura. Ferraresi (1977) diz que a ruptura da ponta ou aresta cortante ocorre devido a grandes forças de usinagem em casos de material quebradiço, corte interrompido e parada instantânea do movimento de corte sem a retirada prévia da ferramenta de corte. O desgaste de flanco é caracterizado pela perda de material na superfície de folga da ferramenta de corte pelo atrito com a superfície usinada e o desgaste de entalhe aparece com a usinagem de materiais duros, sendo produto da abrasão, e se localiza nos dois extremos de contato entre a peça e superfície de folga (Barbosa, 2021).

Para melhor compreender o comportamento e vida das ferramentas de corte, faz-se necessário a medição dos seus desgastes. Para o desgaste de flanco, pode-se medir a largura do desgaste (VB_B) e largura máxima do desgaste ($VB_{Bmáx}$).

Este trabalho teve como objetivo comparar o desempenho de fresas de topo de aço rápido, na usinagem do aço SAE 1020, nitretadas em diferentes temperaturas e com tratamento duplex com deposição de TiN. Além disso, analisar as características da superfície da peça após a usinagem.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram preparadas previamente peças em formato de blocos de dimensões 49 x 75 x 36 mm, de aço SAE 1020, sendo um bloco para cada ferramenta de corte a ser testada.

As ferramentas utilizadas foram quatro fresas de topo de aço rápido – HSS do tipo inteiriça, todas submetidas a tratamento termoquímico superficial de nitretação, uma delas com tratamento duplex. A Figura 1 mostra as características das fresas adotadas.

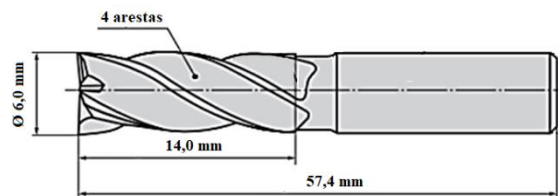


Figura 1 – Fresa de topo inteiriça. Adaptado de Mitsubishi Materials, 2022.

Os tratamentos foram realizados utilizando a proporção de 50% nitrogênio e 50% hidrogênio durante três horas. A pressão foi de cerca de 2 mbar nas nitretações e 0,6 mbar na deposição, esse último sendo realizado durante uma hora e meia.

A máquina ferramenta utilizada nos ensaios foi um Centro de Usinagem Vertical ROMI modelo D600, de rotação máxima de 8000 rpm e motor principal de 20 CV. Os parâmetros de usinagem adotados nos ensaios são detalhados na Tab. 1.

Tabela 1 – Parâmetros de corte

v_c	f_z	a_p	a_e	V_f
20 m/min	0,05 mm/dente	0,5 mm	4 mm	220 mm/min

As condições de parada adotadas para as ferramentas foram de desgaste de flanco máximo de 0,60 mm ou fratura da ferramenta antes de atingir tal medida para desgaste de flanco.

Para monitorar o desgaste das fresas em cada etapa dos ensaios, utilizou-se um microscópio óptico digital de ampliação máxima de 1000x, que foi fixado em uma base construída no laboratório para ser acoplada na mesa da máquina ferramenta. Essa montagem possibilitou maior agilidade e fotos no mesmo padrão e posição para todas as ferramentas. A aproximação da fresa até o microscópio foi realizada por um subprograma dentro do programa de usinagem, no CNC.

Durante o período de corte, remoção de material, o valor RMS médio de corrente elétrica foi selecionado para comparação entre as diferentes condições de tratamento térmico da ferramenta. Para isso, foi utilizado um sistema com três sensores de efeito hall, modelo SCT – 013 – 000, de range 0 a 100 A; uma placa de aquisição de dados montada com resistores divisões de tensão, resistor de carga e capacitor de filtro, além de um microcontrolador Atmega 2569. Os valores RMS de corrente elétrica foram obtidos para cada dois passes de usinagem, equivalente a um ciclo do programa, que vai desde a aproximação da ferramenta na peça, usinagem de dois passes, recuo da ferramenta e posicionamento no microscópio para captura de imagens.

Para as imagens de metalografia das peças usinadas, utilizou-se um microscópio BEL Photonics MTM-1A. Os ensaios de microdureza foram realizados em um equipamento de teste de microdureza Vickers do modelo ISH-TDV1000A da marca *INSIZE*. Para cada ensaio de microdureza nas amostras do material usinado, foi utilizada uma carga de 100 gf durante 15 segundos.

Uma amostra de uma das peças usinadas foi cortada e preparada para imagens de metalografia e ensaio de microdureza. A superfície polida foi preparada perpendicular à superfície usinada para que fosse possível visualizar a camada superficial afetada pela usinagem, espessura do encruamento e comparativo dos grãos da superfície e núcleo da peça, além da microdureza dessas regiões.

Os resultados foram analisados em duas etapas: a primeira com resultados sobre o desgaste das ferramentas e a segunda com os associados às superfícies usinadas. Para melhor mencionar as ferramentas, adotou-se as nomenclaturas mostradas na Tab. 2.

Tabela 2 – Nomenclaturas adotadas para as fresas	
Nomenclatura	Tratamento
HSS-350	Nitretação 350°C
HSS-400	Nitretação 400°C
HSS-400D	Duplex 400°C
HSS-450	Nitretação 450°C

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Desgaste

A fresa HSS-450 suportou 12 passes na peça até fraturar um dos dentes, atingindo o fim de vida. O número de passes não foi suficiente para iniciar desgaste de flanco considerável, como se vê nas Fig. 2(a) e 2(b). A ruptura do dente pode ser associada à dureza atingida pelo processo de nitretação a uma maior temperatura, visto que quanto maior a temperatura e tempo de nitretação, maior poderá ser a profundidade da camada endurecida. Com uma camada dura maior, a aresta de corte tende a perder a capacidade a absorção de choques, o que é desvantajoso para processo de fresamento, corte interrompido.

A ferramenta HSS-350 apresentou grandes lascamentos em todos os dentes após 12 passes na peça. Os lascamentos se deram na forma de camadas paralelas à superfície original, como pode se ver na Fig. 2(c) e 2(d), o que leva a crer que a camada endurecida pelo processo de nitretação foi arrancada, provavelmente próximo à zona de transição da camada endurecida.

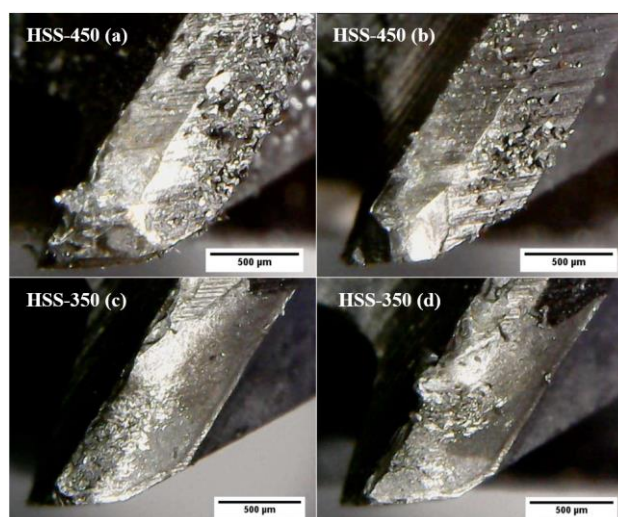


Figura 2 – Fresas HSS-450 e HSS-350 após ensaios

Na Figura 3(a) observa-se falhas na camada depositada antes dos ensaios da fresa HSS-400D. Ela atingiu o critério de parada rapidamente, com apenas 6 passes. Já nos dois primeiros passes a camada de nitretos foi removida, como pode ser visto na Fig. 3(b). Três dos dentes apresentaram fraturas em suas pontas. As crateras apresentaram uma característica rugosa, Fig. 3(c), o que pode estar associado a uma remoção de material pelo efeito da adesão, mecanismo que pode ter sido propiciado pela camada de deposição removida durante a abrasão do material da peça com a ferramenta e adesão de material pelo fluxo irregular de cavaco na superfície da fresa, característico de um processo de corte interrompido a baixa velocidade de corte.

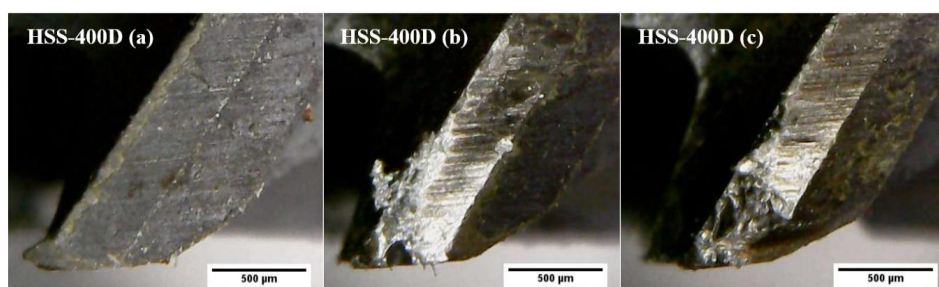


Figura 3 – Fresa HSS-400D. a) antes do ensaio b) camada TiN removida c) fratura acentuada

A fresa HSS-400 atingiu o critério de parada em 10 passes, sendo que até o oitavo ela não apresentou desgastes expressivos que a comprometessem, como se vê na Fig. 4(a). No décimo passe, ela sofreu rupturas similares às da fresa HSS-450, Fig. 4(b). Assim como a HSS-450, essa ferramenta teve um bom comportamento quanto a desgaste por abrasão até atingir o fim de vida. Em condições de corte mais brandas, como um menor avanço, essas duas ferramentas poderiam ter melhor comportamento e vida útil em relação às outras duas.

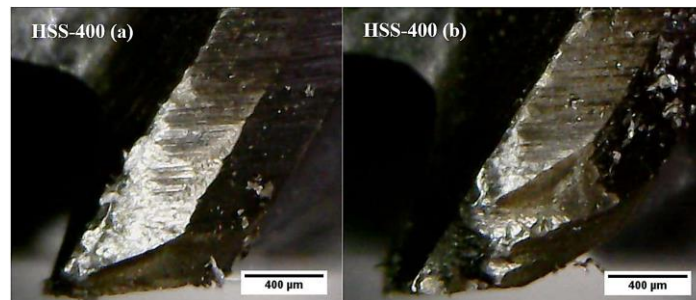


Figura 4 – Fresa HSS-400

As médias dos valores RMS de corrente elétrica medidos durante a remoção de material pelas fresas estão representados no Gráfico 1. Percebe-se que a fresa HSS-450 foi a que menos solicitou o motor da máquina-ferramenta e, levando em conta que seu desgaste foi o menos acentuado entre as demais fresas, é notável que ela apresentou um dos melhores comportamentos entre as ferramentas. Logo em seguida, tem-se que a fresa HSS-400 apresentou um dos menores valores, também associado ao seu menor desgaste.

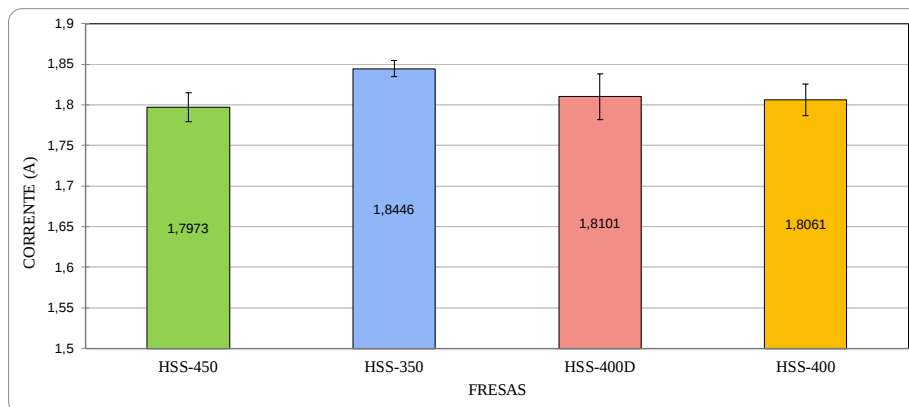


Gráfico 1 – Média das correntes solicitadas por cada fresa na remoção de material

3.2 Metalografia e microdureza da superfície usinada

A Figura 5 mostra a imagem obtida por metalografia em que é possível observar a microestrutura do aço, de baixo teor de carbono, além da diferença entre a superfície deformada pela usinagem e centro da amostra.



Figura 5 – Imagem metalográfica da peça usinada

A região próxima à superfície apresentou valor médio de microdureza ligeiramente superior ao do centro, como pode ser visto no Gráfico 2. Esse comportamento pode ser explicado pelo encruamento da superfície usinada, que é a área afetada pela usinagem e que sofre uma deformação plástica a ponto de ocorrer um aumento de dureza (Griffiths, 2001). Quanto maior a severidade das condições do processo, mais espessa será a camada encruada, pois o encruamento aumenta com o aumento da tensão associada à deformação do material (Guimarães, 2022).

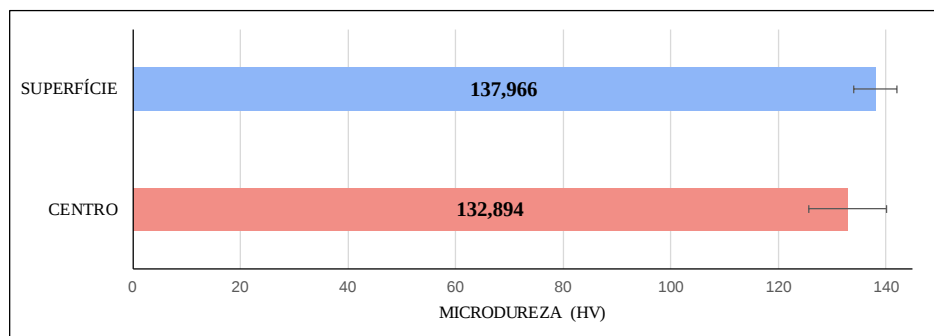


Gráfico 2 – Diferença de microdurezas entre superfície usinada e centro da peça

4 CONCLUSÃO

Para as mesmas condições de usinagem, a fresa HSS-450 foi a que apresentou melhor comportamento, visto que seu desgaste foi menos acentuado, não apresentando desgaste de flanco considerável e realizou a maior quantidade de passes e obteve menor valor médio de corrente elétrica requisitada pela máquina. A fresa HSS-350 apresentou desgaste prematuro com desgaste característico de crateras na superfície de folga e aresta de corte. Já a HSS-400D foi a que apresentou o pior comportamento entre as ferramentas, tendo a camada de nitretos em sua maior parte removida facilmente nos primeiros ensaios, atingindo o limite de vida com a menor quantidade de passes. A HSS-400, em comparação com a HSS-400D apresentou um melhor comportamento, sendo também uma das melhores fresas ensaiadas. Ela não apresentou desgastes consideráveis na aresta de corte até atingir o fim de vida por avaria dos dentes. Obteve um dos menores valores médios de corrente elétrica, depois da HSS-450.

5 REFERÊNCIAS

- Barbosa, M. G. C. B. B. “Influência da preparação de aresta e do avanço na usinagem do aço VP20TS. 2021”. Tese de doutorado. UNICAMP, São Paulo, 2021.
- Bashir, M. I., Shafiq, M., Naeem, M., Zaka-ul-Islam, M., Díaz-Guillén, J. C., Lopez-Badillo, C. M., & Zakaullah, M. (2017). “Enhanced surface properties of aluminum by PVD-TiN coating combined with cathodic cage plasma nitriding”. *Surface and Coatings Technology*, 327, 59-65.
- Childs, Thomas HC, Katsuhiro Maekawa, and Toshiyuki Obikawa. *Metal machining: theory and applications*. Butterworth-Heinemann, 2000.
- Ferraresi, D. *Fundamentos da usinagem dos metais*. São Paulo: Blucher, 1977.
- Griffiths, B. *Manufacturing Surface Technology: Surface Integrity and Functional Performance*. London: Penton Press, 2001.
- Guimarães, M. C. R. “Avaliação dos parâmetros de fresamento na integridade superficial do Inconel 625 depositado por soldagem em aço ABNT 4340”. Tese de doutorado. UNICAMP, São Paulo, 2022.
- Klocke, F. *Manufacturing Processes 1: Cutting*. RWTH ed. Berlin: Springer, 2011.
- Manhães, W. S. “Caracterização metalográfica do aço ABNT/SAE 1020 submetido ao tratamento termoquímico da cementação sólida em caixa e ao tratamento térmico da têmpera”. Trabalho de Conclusão de Curso. IFES, Espírito Santo, 2018.
- Shaw, M. C. *Metal Cutting Principals*. 2ª ed. Nova York: Oxford University Press, 2005.
- Tier, M. A. D. “Avaliação da resistência ao desgaste do aço AISI M2 nitretado a plasma”. Tese de doutorado. UFRGS, Rio Grande do Sul, 1998.
- Trent, E.M.; Wright, P.K., “Metal Cutting”. 4ª ed. Boston: Butterworth – Heinemann, 2000.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Piauí (UFPI) e aos laboratórios de usinagem e de metalografia do curso de Engenharia Mecânica.

7 RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA APLICAÇÃO DO ÓLEO DE SOJA VIA TÉCNICA MQL NO PROCESSO DE TORNEAMENTO DO AÇO SAE 1045

João Vittor Leôncio Machado, jv.leoncio@ufpi.edu.br
Patrick Abreu de Oliveira, patrick.abreu@live.com
Raphael Lima de Paiva, raphaellimap@ufpi.edu.br

Universidade Federal do Piauí, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Campus Universitário Ministro Petrônio Portela, Ininga, CEP 64.049-550, Teresina - PI.

Resumo: A utilização do fluido de corte em operações de usinagem é uma alternativa para aumentar a produtividade na indústria metal mecânica. No entanto, a aplicação de fluidos de corte em grandes quantidades, especialmente aqueles a base de óleo mineral, pode acarretar problemas ambientais e prejudicar a saúde do operador. Neste contexto, a técnica de mínima quantidade de lubrificação (MQL) é promissora, visto que se trata de uma alternativa mais sustentável e econômica devido a baixa vazão de fluido de corte utilizada no processo, principalmente considerando a utilização de óleos vegetais. Nesse viés, este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade da utilização do óleo de soja comercialmente disponível como fluido de corte aplicado pela técnica MQL no torneamento do aço SAE 1045 com ferramenta de metal duro, avaliando seu efeito de lubri-refrigeração na rugosidade da peça torneada, na corrente elétrica da máquina-ferramenta e nas características visuais do cavaco. Ensaios a seco também foram realizados para comparação. Diferentes condições de corte foram testadas variando-se dois níveis de avanço (0,23 mm/rot e 0,35 mm/rot) e mantendo valores constantes de velocidade de corte ($v_c = 173$ m/min) e profundidade de corte ($a_p = 1,0$ mm). Os principais resultados mostraram que os valores obtidos para a rugosidade nos ensaios a seco e aplicando óleo de soja não apresentaram diferenças expressivas, sendo o avanço o parâmetro que mostrou maior influência para a rugosidade da superfície torneada. A corrente elétrica da máquina-ferramenta durante o período de corte no ensaio utilizando óleo de soja foi maior que a do ensaio a seco. Cavacos obtidos pela técnica MQL apresentaram coloração marrom, enquanto a cor azul/violeta foi predominante nos cavacos obtidos pelo ensaio a seco, o que indica uma menor temperatura do cavaco quando aplicado o fluido de corte.

Palavras-chave: Torneamento, Aço SAE 1045, Óleo de soja, Técnica MQL, Rugosidade.

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento da indústria de fabricação mecânica e o aumento da demanda de componentes e peças metálicas, foi necessário encontrar um meio para aumentar a produtividade dos processos de fabricação. No que diz a respeito a processos de usinagem, a alta produtividade está normalmente associada com elevadas velocidades de corte. No entanto, esta estratégia promove o desenvolvimento de elevadas temperaturas na zona de corte, o que pode afetar negativamente tanto peça quanto a ferramenta de corte (Debnath et al., 2014). Para contornar esse desafio, a aplicação de fluido de corte durante a usinagem pode ser, a princípio, uma solução para reduzir a temperatura na zona de corte e aumentar a produtividade (Vieira et al., 2001).

Neste sentido, de acordo com Shashidhara e Jayaram (2010), apesar das capacidades de refrigeração e lubrificação do fluido de corte no processo de usinagem, os óleos minerais apresentam sérios problemas ambientais e de saúde durante seu manuseio, cerca de 80% das doenças ocupacionais em operadores são oriundas do contato com o fluido de corte. No intuito de substituir os óleos minerais em recorrência dos riscos ao operador e ao meio ambiente, os óleos de base vegetal se mostraram como uma alternativa promissora.

A técnica de mínima quantidade de lubrificação (MQL) se mostra como uma alternativa sustentável de aplicação de fluido de corte em processos de usinagem, sua aplicação é feita por uma mistura de ar e fluido formando uma fina camada de névoa, se destacando pelo uso de óleos vegetais como fluido de corte (Debnath et al., 2014). A vazão de fluido é baixa (cerca de 50 a 500 mL/h), reduzindo os custos envolvendo o fluido e tornando o processo menos nocivo ao operador e ao meio ambiente (Walker, 2015).

Com isso, no contexto econômico, ambiental e de saúde, a aplicação de fluido de corte via técnica MQL pode ser alternativa a se considerar. Seus maiores benefícios é a redução do consumo de fluido de corte, cerca de 10 000 vezes menor que a técnica de aplicação por jorro (Chetan et al., 2015). Além da redução de impacto ambientais e de saúde do

operador, a técnica MQL combinada com o uso de fluido de corte biodegradável pode contribuir para melhorar o desempenho das operações de corte e do acabamento superficial, e sua aplicação vem mostrando resultados positivos quando comparados com a usinagem a seco e aplicação por jorro (Debnath et al., 2014).

No que diz respeito à usinagem de aços, Revuru et al. (2020) compararam o desempenho do torneamento do aço AISI 4140 utilizando óleos vegetais como fluido de corte, aplicados pelas técnicas convencional (jorro) e MQL. Ensaios a seco (sem aplicação de fluido de corte) também foram realizados. O óleo utilizado como base na técnica MQL foi o óleo de soja e para a técnica de jorro foi utilizado o mesmo óleo, porém misturado com 95% de água. Os autores observaram que o avanço foi o parâmetro mais significativo para os resultados de rugosidade e que o tipo de aplicação de fluido de corte não exerceu tanta influência na rugosidade da peça. Observaram também que a velocidade de corte, avanço e as condições de lubrificação não tiveram um impacto significativo no desgaste da ferramenta. O desgaste médio na usinagem a seco e a jorro são muito próximos, enquanto o MQL apresentou valores levemente menores, porém, nos três processos os resultados de desgaste não foram significativos.

Bedi et al. (2020) estudaram a usinagem do aço AISI 304 utilizando óleo de coco e de arroz via técnica MQL. Diferentes condições de corte também foram avaliadas, e ensaios a seco foram realizados para efeito comparativo. Os autores observaram uma redução de cerca de 31,43% e 29,2% das forças de cortes na usinagem com a técnica MQL utilizando respectivamente óleo de arroz e óleo de coco quando comparada à usinagem a seco. De acordo com os autores, o atrito excessivo na usinagem a seco causa um aumento de temperatura na interface cavaco-ferramenta, enquanto na usinagem com aplicação da técnica MQL ocorre uma redução significativa da temperatura na zona de corte. O acabamento superficial com o uso da técnica MQL apresentou resultados melhores quando comparado à usinagem a seco.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade da utilização do óleo de soja comercialmente disponível como fluido de corte aplicado pela técnica MQL no torneamento do aço SAE 1045 com ferramenta de metal duro, avaliando seu efeito de lubri-refrigeração na rugosidade da peça torneada, na corrente elétrica da máquina-ferramenta e nas características visuais do cavaco.

2 METODOLOGIA

Os ensaios de torneamento cilíndrico externo foram realizados em um torno mecânico horizontal Veker, modelo TVK – 1660ECO, com faixa de rotação de 45 a 1800 rpm e motor elétrico trifásico de potência nominal 3,35 kW.

O corpo de prova utilizado foi um tarugo de aço carbono SAE 1045 com diâmetro de 47 mm e comprimento de 100 mm. A sua dureza foi medida experimentalmente por meio do durômetro ISH-BRV da fabricante INSIZE. Um total de seis medições foram realizadas, obtendo-se um valor de dureza médio de 210 ± 6 HB. Sua microestrutura predominante é de ferrita e perlita conforme é indicado na Figura 1. A composição química do aço SAE 1045 é apresentada na Tabela 1.

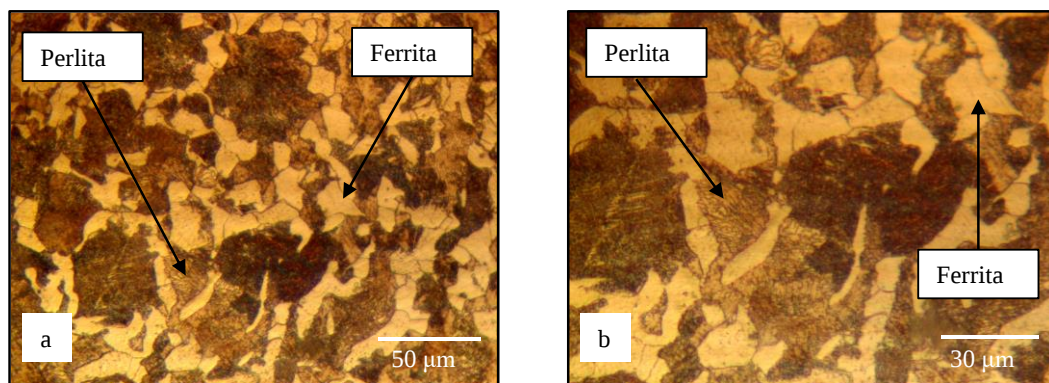


Figura 1. Microestrutura do aço SAE 1045 utilizado no experimento ampliado (a) 500x (b) 800x.

Tabela 1. Composição química do aço SAE 1045 segundo a NBR NM 87 (2000).

Classificação SAE / AISI	Carbono (C) %	Manganês (Mn) %	Fósforo (P) % máx.	Enxofre (S) % máx.
1045	0,43-0,50	0,60-0,90	0,040	0,050

A ferramenta de corte utilizada nos ensaios de torneamento foi uma pastilha de metal duro da fabricante HADSTO, com designação TNMG160408BR-M, classe P, com recomendações de corte para profundidade de corte (a_p) na faixa de 1-4 mm e avanço (f) entre 0,2–0,50 mm/rot.

Em relação as condições de lubri-refrigeração, foi utilizado óleo de soja comercialmente disponível como fluido de corte. A aplicação foi realizada seguindo os fundamentos da técnica de mínima quantidade de lubrificação (MQL) com os seguintes parâmetros: vazão de fluido de corte de 60 mL/h e pressão de ar comprimido de 6 bar (0,6 MPa). Realizou-

se também ensaios a seco (sem aplicação de fluido de corte) a fim de comparar os resultados obtidos por meio da técnica MQL.

Os parâmetros de corte utilizados nos ensaios de torneamento cilíndrico externo foram: velocidade de corte (v_c) de 173 m/min e profundidade de (a_p) de 1,00 mm, ambos constantes para todos os ensaios. Dois valores de avanço foram testados: 0,23 mm/rot e 0,35 mm/rot. Para cada ensaio, foram usinados 50 mm no comprimento do corpo de prova (direção de avanço). Na Figura 2 e Tabela 2 são apresentados a configuração da máquina-ferramenta para os ensaios e planejamento experimental, respectivamente.

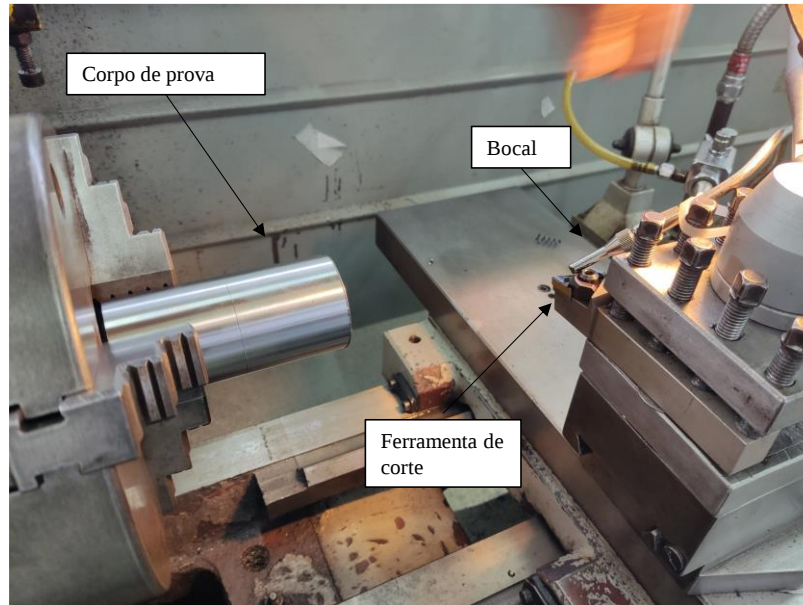


Figura 2. Configuração utilizada nos experimentos.

Tabela 2. Planejamento experimental para os ensaios de torneamento.

Ensaio	Condição de lubri-refrigeração	Avanço (f) [mm/rot]
1	Seco	0,23
2		0,35
3	Óleo de soja aplicado via MQL	0,23
4		0,35

Os parâmetros de saída avaliados neste trabalho foram a rugosidade da peça, a corrente elétrica na máquina-ferramenta e o cavaco gerado em cada ensaio. Os valores da rugosidade da superfície torneada foram obtidos com auxílio de um rugosímetro Mitutoyo SJ-210, com cut-off de 0,8 mm, comprimento de avaliação de 4,0 mm e filtro Gaussiano. Cinco medições da rugosidade foram realizadas para cada condição de corte para análise da média e desvio padrão. Os parâmetros de rugosidade selecionados para análise foram R_a e R_z .

A corrente elétrica do motor da máquina-ferramenta foi medida por um conjunto composto por um microcontrolador Arduino ATmega 2560 com circuito eletrônico para aquisição de corrente elétrica por sensor de Efeito Hall não invasivo com faixa de medição de 0-100 A, modelo SCT-013-000, conforme metodologia utilizada por De Paiva e Barbosa (2018). O sensor mensurou os valores da corrente elétrica (valor RMS) de uma das fases do motor durante os ensaios, e o valor médio durante o período de corte foi utilizado para a análise.

Após o fim de cada ensaio coletou-se parte dos cavacos gerados durante o torneamento do aço SAE 1045 para análise de formato e cor do cavaco.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 3 observa-se a rugosidade R_a e R_z para o avanço de 0,23 mm/rot e 0,35 mm/rot medidos experimentalmente após torneamento a seco e com óleo de soja aplicado via técnica MQL.

Em relação ao efeito da condição de lubri-refrigeração, observa-se da Figura 3 que tanto para o menor avanço quanto para o maior, a variação dos valores de rugosidade R_a e R_z obtidos foi pouco expressiva quando comparado a usinagem a seco com a usinagem com aplicação da técnica MQL (variações menores que 5%). Portanto, pode-se inferir que, para as condições testadas neste trabalho, as diferentes estratégias de lubri-refrigeração não exerceram influência muito significativa na rugosidade da peça, semelhante ao observado por Revuru et al., 2020.

Por outro lado, com o aumento do avanço ocorreu também um aumento da rugosidade implicando que a taxa de avanço exerce uma influência significativa na rugosidade superficial da peça (Gupta, 2020).

Na Figura 4 é observado os efeitos do torneamento cilíndrico externo aplicando óleo de soja utilizando técnica MQL na corrente elétrica do motor máquina-ferramenta quando comparadas a usinagem a seco.

Nota-se da Figura 4 que com o aumento do avanço ocorre também um aumento da corrente elétrica na máquina-ferramenta e consequentemente um aumento da potência exigida para realizar o processo, dessa forma, sugere-se segundo Machado et al. (2015) um aumento nos esforços de cortes atuantes na usinagem da peça.

Em relação à influência da condição de lubri-refrigeração, observa-se da Figura 4 que a utilização do óleo de soja aplicado via técnica MQL aumentou a corrente elétrica do motor da máquina-ferramenta em cerca de 10% em comparação à usinagem a seco (sem aplicação de fluido de corte), independentemente do avanço utilizado sugerindo assim uma maior potência exigida na máquina-ferramenta, o que pode ser relacionado com o aumento nos esforços de corte (Machado et al., 2015). Com isso, pode-se inferir que a aplicação de óleo de soja implica em uma maior potência elétrica exigida na máquina-ferramenta, que está relacionada a uma maior potência mecânica e maiores esforços de corte durante o processo de torneamento (Machado et al., 2015).

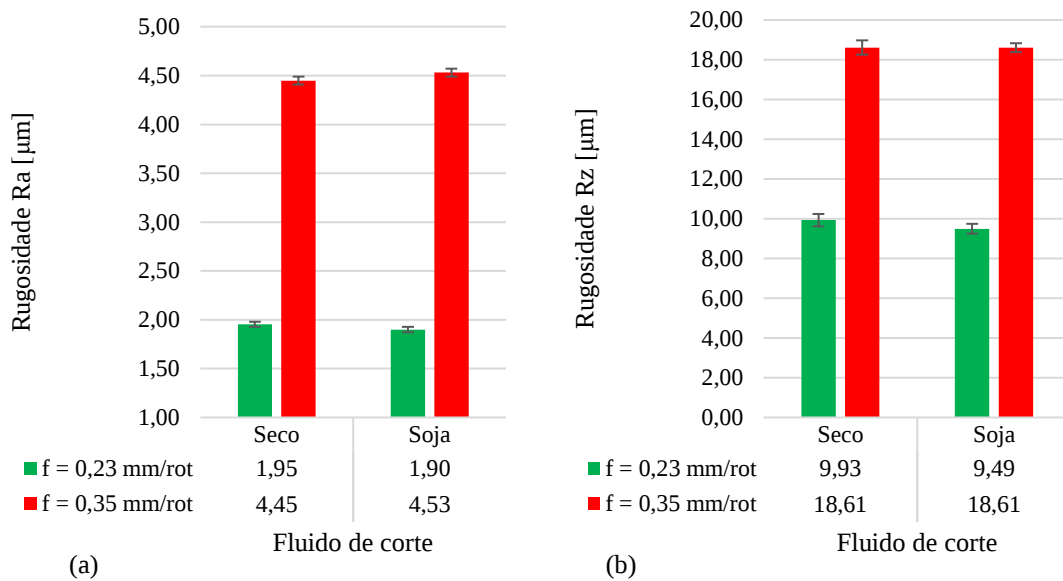


Figura 3. Rugosidade (a) Ra e (b) Rz para os avanços $f = 0,23$ mm/rot e $f = 0,35$ mm/rot.

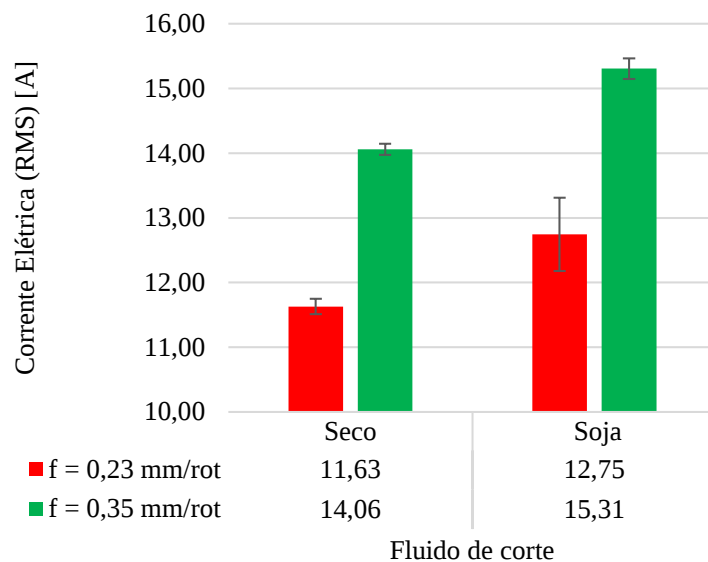


Figura 4. Valor médio da corrente elétrica durante a operação de corte.

Na Figura 5 pode-se observar os cavacos obtidos durante os ensaios a seco e utilizando óleo de soja como fluido de corte aplicado pela técnica MQL. Pode-se observar a diferença entre as cores dos cavacos obtidos em cada ensaio, enquanto na usinagem a seco o cavaco apresenta uma cor mais azulada, na usinagem utilizando a técnica MQL o cavaco apresentou uma cor marrom, indicando, segundo Gupta et al. (2018), uma redução da temperatura do cavaco quando aplicado óleo de soja como fluido de corte via técnica MQL. Nesse sentido, ressalta-se a função de refrigeração do fluido de corte, mesmo aplicado pela técnica MQL, o que contribuiu para reduzir a temperatura do cavaco.

Quanto à forma do cavaco, nota-se da Figura 5 que o torneamento com aplicação de óleo de soja via técnica MQL resultou em cavacos helicoidais mais longos, independente do avanço utilizado. Para o torneamento a seco, observa-se um cavaco mais curto quando empregado o maior avanço ($f = 0,35$ mm/rot).

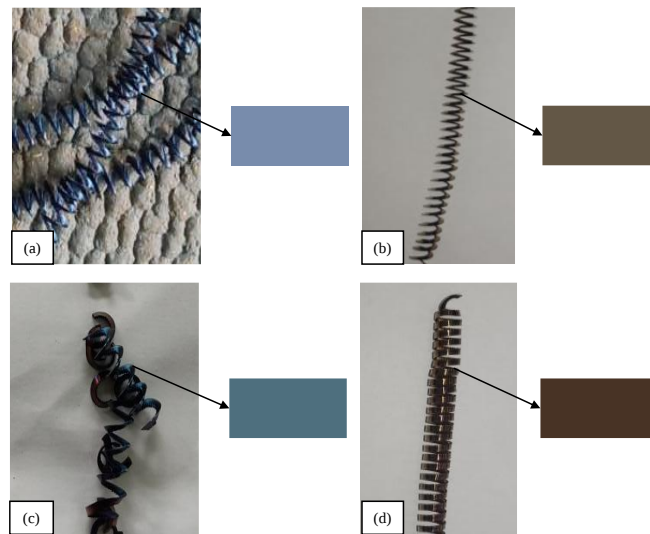


Figura 5. Cavaco obtido na usinagem (a, c) a seco e (b, d) via MQL utilizando avanço (a, b) $f = 0,23$ mm/rot (c, d) $f = 0,35$ mm/rot.

4 CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados obtidos nos ensaios de torneamento cilíndrico externo nas condições a seco e via técnica de mínima quantidade de lubrificação utilizando óleo de soja como fluido de corte, pode-se concluir que:

- O avanço apresentou ser o parâmetro com maior influência na rugosidade superficial da peça (parâmetro R_a e R_z). O aumento desta variável de entrada promoveu um aumento nos valores de rugosidade R_a e R_z .
- Em comparação com a usinagem à seco, o uso do óleo de soja aplicado via técnica MQL não apresentou influências significativas na rugosidade da superfície torneada.
- A aplicação do óleo de soja via técnica MQL gerou valores de corrente elétrica cerca de 10% maiores no motor elétrica da máquina-ferramenta quando comparados com os valores obtidos na usinagem a seco.
- O aumento do avanço aumentou de forma significativa os valores de corrente elétrica da máquina-ferramenta conforme esperado.
- A usinagem a seco gerou cavacos com a coloração azul, enquanto a usinagem utilizando óleo de soja via técnica MQL gerou cavacos com a coloração marrom, sugerindo menores temperaturas do cavaco quando aplicada a técnica MQL.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Piauí (UFPI). Os autores também agradecem ao CNPq e à UFPI pelo apoio financeiro recebido do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica PIBIC 2022 - 2024 (nº do processo 145935/2022-1) que permitiu o desenvolvimento deste trabalho.

6 REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas e Técnicas. NBR NM 87: Aço carbono e ligados para construção mecânica – Designação e composição química. Rio de Janeiro, 2000.
- Bedi, S.S., Behera, G.C. and Datta, S., 2020. “Effects of Cutting Speed on MQL Machining Performance of AISI 304 Stainless Steel Using Uncoated Carbide Insert: Application Potential of Coconut Oil and Rice Bran Oil as Cutting Fluids”. *Arab J Sci Eng*, Vol. 45, pp. 8877–8893. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04554-y>.
- Chetan, Ghosh, S. and Rao, P.V., 2015. “Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review”. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 100, pp. 17-34.
- De Paiva, R.L. and Barbosa, M.G.C.B., 2018. “Análise da Medição de Potência Elétrica da Máquina-Ferramenta no Processo de Furação”. *XXI Colóquio de Usinagem - UFTM*, Uberaba MG.
- Debnath, S., Reddy, M.M. and Yi, Q.S., 2014. “Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review”. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 83, pp. 33-47.
- Gupta, M.K., Pruncu, C.I., Mia, M., Singh, G., Singh, S., Prakash, C., Sood, P.K. and Gill, H.S., 2018. “Machinability investigations of Inconel-800 super alloy under sustainable cooling conditions”. *Materials*, Vol. 11. <https://doi.org/10.3390/ma11112088>

- Gupta, A., Kumar, R., Kumar, H. and Garg, H., 2020. “Comparative performance of pure vegetable oil and Al_2O_3 based vegetable oil during MQL turning of AISI 4130”. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 28, pp. 1662-1666.
- Machado, A.R., Abrão, A.M., Coelho, R.T. and Da Silva, M.B., 2015. “Teoria da Usinagem do Materiais”. 3 ed. SP: Editora Blucher.
- Revuru, R.S., Zhang, J.Z. and Posinasetti, N.R., 2020. “Comparative performance studies of turning 4140 steel with TiC/TiCN/TiN-coated carbide inserts using MQL, flooding with vegetable cutting fluids, and dry machining”. *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 108, pp. 381–391. doi.org/10.1007/s00170-020-05378-8.
- Shashidhara, Y.M. and Jayaram, S.R., 2010. “Vegetables oils as a potential cutting fluid – An Evolution”. *Tribology International*, Vol. 43, pp. 1073-1081. doi.org/10.1016/j.triboint.2009.12.065.
- Viera, J.M., Machado, A.R. and Ezugwu, E.O., 2001. “Performance of cutting fluids during face milling of steels”. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 116, pp. 244-251. doi.org/10.1016/S0924-0136(01)01010-X
- Walker, T., 2015. “The MQL handbook: A guide to machining with Minimum Quantity Lubrication”. Unist Guide.

7 RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

PROJETO DE MECANISMOS QUATRO BARRAS PARA SUPERFÍCIES DE CONTROLE EM AERONAVE RÁDIO CONTROLADA

Vinícius José Aragão de Almeida Barrozo, viniciusjose05@ufpi.edu.br¹
Eduardo Wellyton Costa Oliveira, eduardowellyton@ufpi.edu.br¹

¹Universidade Federal do Piauí

Resumo: Neste trabalho, apresenta-se uma metodologia de projeto de mecanismos do tipo quatro barras para as superfícies de controle convencionais de uma aeronave rádio controlada. São apresentados conceitos limitantes no design de mecanismos e condições de contorno, que são definidos pelo modelo da aeronave analisada. Nesse caso, a Ronin, projetada pela Equipe Delta do Piauí Aerodesign com o objetivo de disputar a competição SAE Brasil Aerodesign, é utilizada. Ela utiliza perfis aerodinâmicos esbeltos e faz uso de servomotores para mover os mecanismos. A metodologia é dividida em duas etapas: síntese e análise. A síntese é realizada de forma gráfica com o software de CAD SolidWorks® e a análise é feita posteriormente com um código escrito em SciLab®. Durante o processo, foi estabelecida uma padronização dos ângulos iniciais e tamanhos dos elos manivela e seguidor, com o objetivo de melhorar a transmissão das forças e facilitar a construção. Por fim, são calculadas as dimensões adequadas para os elos, a posição dos pontos na estrutura da aeronave e os valores dos ângulos que permitem a validação do projeto. Isso inclui a posição angular dos demais elos em relação ao elo terra, garantindo que não haja pontos mortos e ângulos de transmissão inadequados. Em conclusão, o modelo é montado e testado para as deflexões exigidas no software SolidWorks®, resultando no projeto de três mecanismos em conformidade com os requisitos e coesos em relação à análise de posição.

Palavras-chave: Servo, Mecanismo, Aerodesign, Controle, Síntese.

1 INTRODUÇÃO

Os mecanismos, durante o design de máquinas, possuem influência na eficiência e funcionamento das mesmas por serem responsáveis pela transmissão de movimento, forças e torques presentes. Dentre os principais tipos de mecanismos, o mais empregado é o de quatro barras caracterizado por elos geralmente organizados em quatro funções, terra, manivela, acoplador e seguidor (NORTON, 2010).

No desenvolvimento de projetos de mecanismos, é essencial considerar alguns conceitos adicionais para garantir um funcionamento adequado. Um desses conceitos é a determinação dos pontos mortos dele, pontos no intervalo os quais o mecanismo para de se mover. Esses pontos podem ocorrer propositalmente, como sendo os limites inferior e superior em um motor a combustão interna (ÇENGEL; BOLES; KANOĞLU, 2011), ou de forma indesejada durante o curso do mecanismo em caso de colinearidade de dois elos, impedindo seu funcionamento correto (NORTON, 2010).

Outra variável de projeto importante são os ângulos de transmissão, que indicam a eficiência na transmissão das forças durante o curso, sendo o ângulo agudo entre as projeções dos elos acoplador e seguidor, cuja tangente trigonométrica é a razão entre as componentes tangente e axial do vetor de força aplicada pelo acoplador no seguidor, devendo esta segunda ser minimizada, pois contribui unicamente com tensões e não movimento no elo (HIBBELER, 2004), e segundo Norton (2010) recomenda-se estarem entre 45° e 90°.

Na aeronáutica, os mecanismos são utilizados principalmente em razão dos sistemas de comando, superfícies móveis que rotacionam em torno de um eixo utilizando de suas variações angulares para controlar as deflexões de cada um e ao combiná-los realizar manobras de voo do avião (BARROS, 2001). Os sistemas de controle de uma aeronave comercial comum são aileron e leme para curvas, profundor para movimentos de arfagem e superfícies hiper sustentadoras como *flap*, distribuídas na asa e empenagens do avião e seus mecanismos devem ter a capacidade de realizar as deflexões exigidas pelo projeto (ANDERSON JR, 2015).

Reduzindo o escopo para um projeto de aeronave rádio controlada para a competição SAE Brasil Aerodesign, cujos comandos atuados por servomotores acoplados em nervuras próximas das superfícies de controle. Na competição é frequente o emprego de aerofólios cujas demandas aerodinâmicas resultam em geometrias estreitas restringindo as possibilidades de servos motores a serem utilizados devido ao menor espaço disponível para o elo manivela, que com a amplitude de movimento do servomotor, definem as condições de contorno do mecanismo.

Diante disso, é descrito o projeto dos mecanismos das superfícies de controle em uma aeronave para tal competição, o qual segundo Budynas et al. (2011) deve possuir um processo de síntese com meios de analisar e avaliar se os resultados

são satisfatórios e em caso de sim se irão ser bem executados, de modo que os mecanismos sejam funcionais e confiáveis. Logo, em conformidade com a literatura, são sintetizados por meio de programas de CAD (Computer-Aided Design) e precisam ser validados por meio de análises, sejam elas matemáticas ou gráficas, para que o projeto possa ser aplicado na aeronave real que o parametrizou.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é a síntese e análise de três mecanismos de uma aeronave para a competição SAE Brasil Aerodesign, de modo que satisfação as demandas e possam ser aplicados na prática.

2 METODOLOGIA

Para concluir os objetivos de projeto, será necessária uma síntese dos conjuntos de cada mecanismo, além de formas de validar a transmissão do movimento. Será sintetizado no software CAD *SolidWorks*® cada elo por meio de coordenadas polares. A análise se dará por meio de montagem no mesmo, e através de código em *SciLab*® para avaliar a transmissão de movimento e forças, garantindo o correto funcionamento das superfícies de controle, cujos resultados serão visualizados por meio de gráficos, permitindo uma avaliação precisa do desempenho dos mecanismos projetados.

Destarte, são identificadas as superfícies de controle da aeronave analisada, tomando como objeto de estudo a aeronave Ronin da Equipe Delta do Piauí Aerodesign, a qual deve possuir as seguintes superfícies de controle: ailerons, fixados um em cada lado da asa; profundor situado na empenagem horizontal e leme localizado na empenagem vertical.

2.1 Síntese Dos Mecanismos

Para a definição dos pontos, elos e cálculos de análise e síntese é seguida a metodologia proposta por Norton (2010). Devido aos perfis e tamanhos de cada nervuras serem definidas com maior prioridade em relação ao projeto de mecanismos, é preciso definir com um software de CAD o ponto O₂ (Junta Manivela-Terra) do mecanismo de modo que o servo escolhido para atuação fique bem acoplado.

O ponto O₄ (Junta Seguidor-Terra) é definido como eixo de rotação do comando previamente projetado, sendo o segmento de reta entre estes dois pontos definido por Elo Terra. Outro ponto que é definido sem cálculos é o ponto A (Junta Manivela-Acoplador) com base no elo padrão do servo, resultando no Elo Manivela em conjunto com o ponto O₂.

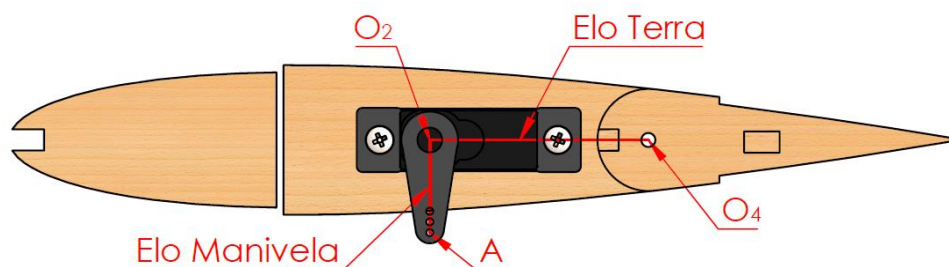


Figura 1. Representação em CAD dos elos Terra e Manivela.

Com estes dois elos iniciais em mãos, em conjunto com as variações angulares do Motor e Seguidor em dois momentos diferentes, é feita a síntese gráfica dos elos faltantes em software de CAD. Como meio de melhorar os ângulos de transmissão no intervalo de funcionamento é definido que os ângulos iniciais θ_{20} e θ_{40} serem ambos de 90° com relação ao Elo Terra. As amplitudes de movimentos angulares e tamanhos dos elos são os mesmos em todas as superfícies para os elos Motor e Seguidor e se encontram na Tab. 1.

Tabela 1. Valores padronizados dos mecanismos.

Variação Angular Motor (graus)	Variação Angular Seguidor (graus)	Comprimento Elo Motor (mm)	Comprimento Elo Seguidor (mm)
±45	±25	13	21,75

O ponto B é definido em coordenadas polares como o comprimento do Seguidor e ângulo inicial θ_{40} em relação ao elo Terra. Posteriormente, realizou-se a análise gráfica unindo os pontos A e B definindo o elo Acoplador. Realizado o procedimento para todas as superfícies de comando, a diferença dimensional no elo terra e padronização do elo manivela, inerente aos servos selecionados, ocasionou diferenças no comprimento do elo acoplador, como mostra a Tab. 2.

Tabela 2. Valores específicos de cada mecanismo.

Superfície de Controle	Aileron	Leme	Profundor
Comprimento Terra (mm)	67,32	45,02	53,97
Comprimento Acoplador (mm)	68,14	46,23	54,99

2.2 Análise Dos Mecanismos

Feita a síntese, é iniciada a análise de posição de cada mecanismo, seguindo a metodologia de Norton (2010), tendo como ângulo inicial do motor a deflexão mínima do servo (45°) com passo de 1 grau até chegar na deflexão máxima (135°). A metodologia se baseia no uso de vetores em coordenadas polares representando cada elo em todos os momentos analisados, os cálculos são feitos com base em relações trigonométricas entre as posições relativas de cada ponto descrito anteriormente, tendo em vista os graus de liberdade de cada elo.

Considerando a complexidade dos cálculos envolvidos na análise de mecanismos, neste trabalho, optou-se por utilizar a linguagem *Scilab*® para implementar um código que executasse esses cálculos. A escolha dessa linguagem deve-se ao fato de ela possuir funções matemáticas integradas, dispensando a necessidade de pacotes adicionais para os cálculos. Além disso, o *Scilab*® oferece recursos como o Navegador de Variáveis, que permite verificar as variáveis ao longo do código, agilizando o *debug*.

O código produz uma matriz que registra as posições angulares de cada elo durante o movimento do mecanismo. Com base nesses dados, são gerados gráficos que representam a posição angular θ_4 em função de θ_2 . Além disso, é gerado outro gráfico que mostra os ângulos de transmissão, que podem ser a soma de θ_3 e θ_4 ou seu ângulo suplementar caso sejam obtusos, juntamente com os limites recomendados por Norton (2010). Com relação aos pontos mortos, os ângulos θ_2 e θ_3 são descritos ao longo do movimento do mecanismo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da síntese gráfica realizada, é possível montar cada mecanismo no *SolidWorks*®. Na Figura 2, apresenta-se a montagem dos servos encaixados nos aerofólios, permitindo o movimento adequado do mecanismo.

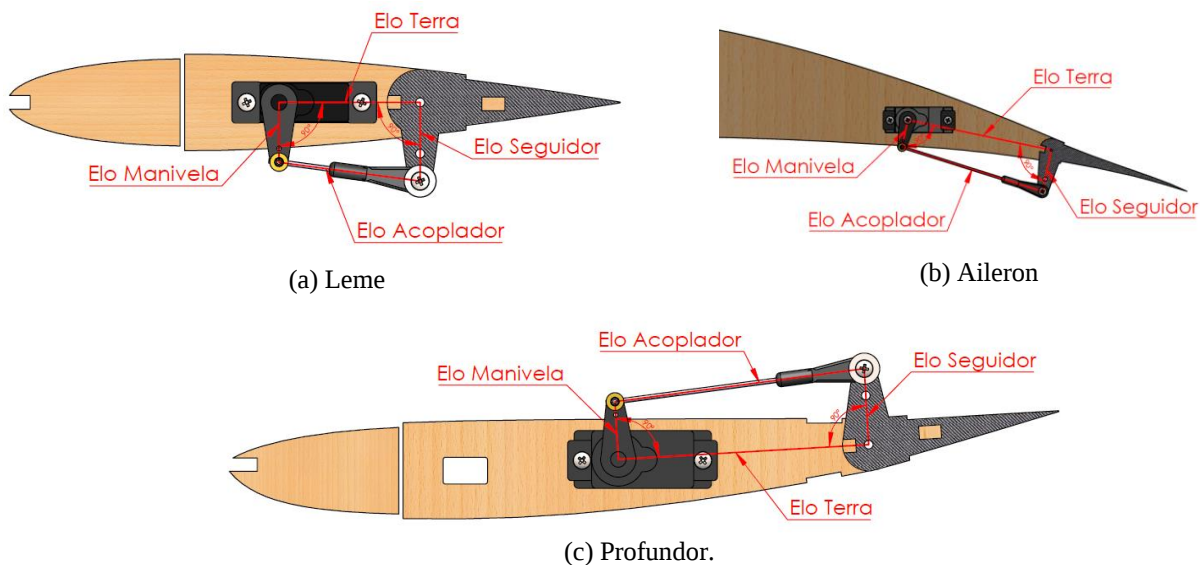


Figura 2. Representação em CAD dos mecanismos de cada superfície de controle.

As deflexões são testadas na montagem, movimentando o elo Manivela para seus dois pontos mortos (superior e inferior) e medidos os ângulos do Seguidor para cada situação, sendo visto na Fig. 3.

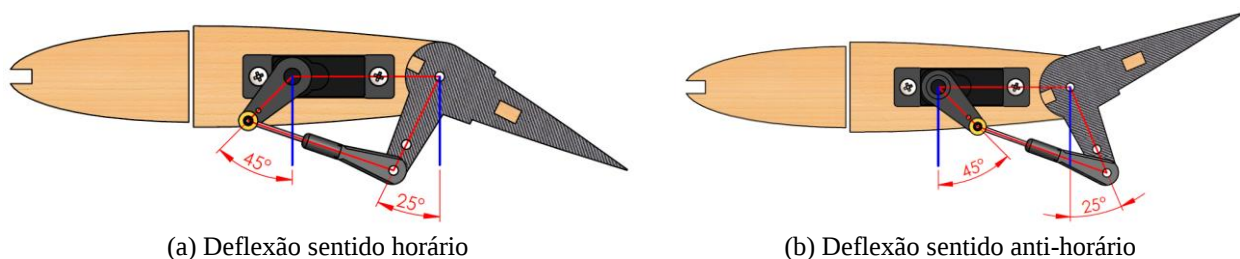
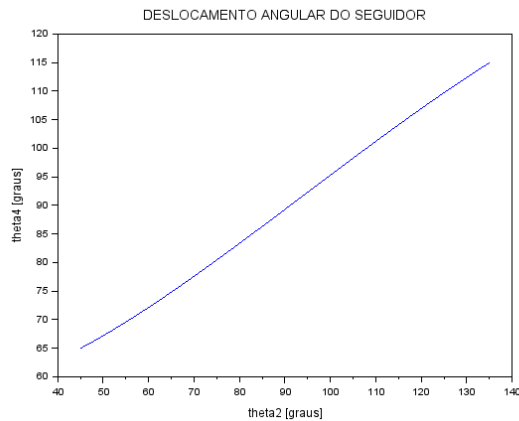
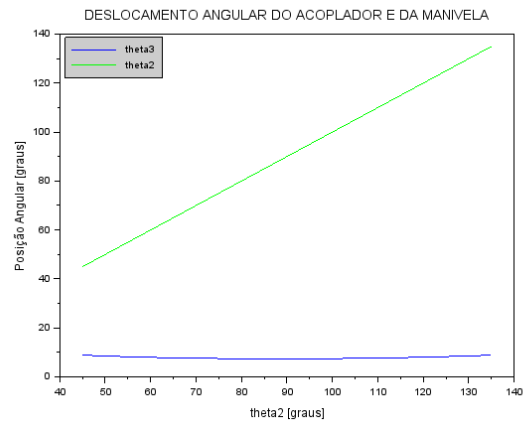


Figura 3. Representações em CAD das deflexões no leme

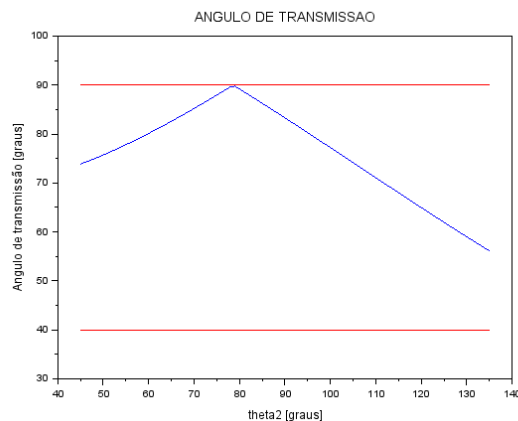
Os resultados obtidos na análise de posição são apresentados na Fig. 4.



(a) Posição angular do seguidor.



(b) Posição angular da manivela e acoplador.



(c) Ângulo de transmissão.

Figura 4. Gráficos de saída da análise de posição em função da manivela.

Com base nos gráficos, cujos ângulos θ tem como referência o elo Terra, é possível ver que a transmissão do movimento ocorre corretamente (Fig. 4(a)); que não há intersecção das linhas, implicando que no período exigido não há colinearidade dos elos acoplador e manivela, indicando a ausência de pontos mortos não desejados (Fig. 4(b)); e por fim os ângulos de transmissão se mantêm dentro dos limites seguros (NORTON,2010), sendo as linhas vermelhas os limites e a azul o ângulo de transmissão em cada ponto (Fig. 4(c)). Com isso cumprindo todas as exigências para uma boa operação do movimento segundo Norton (2010).

4 CONCLUSÃO

Com base nos dados apresentados, a metodologia de projeto demonstrou ser concisa e de fácil aplicação. Foi validada tanto por meio da montagem gráfica quanto pela análise realizada através do código. A síntese do projeto está em conformidade com a literatura de referência em todos os aspectos. Consequentemente, os mecanismos projetados estão prontos para serem utilizados na aeronave em questão e podem servir como base para a síntese de outros mecanismos no futuro.

5 REFERÊNCIAS

- ANDERSON JR, John D., 2015. *Fundamentos de engenharia aeronáutica*. AMGH Editora.
- BARROS, C. P., 2001. *Uma metodologia para o desenvolvimento de projeto de aeronaves leves e subsônicas*. Belo Horizonte.
- BUDYNAS, Richard Gordon et al, 2011. *Shigley's mechanical engineering design*. New York: McGraw-Hill.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A.; KANOĞLU, Mehmet, 2011. *Thermodynamics: an engineering approach*. New York: McGraw-hill.

HIBBELER, Russell Charles, 2004. *Engineering mechanics: dynamics*. Pearson Education.

NORTON, Robert L., 2010, *Cinemática e dinâmica dos mecanismos*. [S.l.]: AMGH Editora.

6 RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ANÁLISE AERODINÂMICA DE UMA AERONAVE PARA COMPETIÇÃO SAE AERODESIGN

Matheus Vitor Amorim Alves, matheusamorim9@ufpi.edu.br¹

Vinícius Queiroz Sampaio Macedo Paiva, viniciusqsmpaiva@gmail.com²

Anna Beatriz Leite Vieira, annaleitee22@gmail.com³

¹Universidade Federal do Piauí - UFPI

Resumo: Com o fito de alcançar uma aeronave cada vez mais competitiva, uma correta caracterização aerodinâmica é um pilar fundamental para um projeto de excelência, onde as equipes se veem obrigadas a elaborar protocolos de análises cada vez mais precisas e robustas para garantir o pleno funcionamento e consequente voo da aeronave conferindo assim a melhor colocação possível na competição. Partindo disso, buscou-se por métodos analíticos obter e avaliar os parâmetros aerodinâmicos intrínsecos à geometria da aeronave. A análise foi realizada por meio dos softwares XFRL5 e DATCOM, utilizando-os mutuamente de forma complementar. Ademais verificou-se o efeito das superfícies hiper sustentadoras nas polares de arrasto e sustentação, conferindo, portanto, uma deflexão máxima de 25°. As análises foram feitas para regime de voo reto nivelado e, portanto, foi desconsiderado a influência do efeito solo.

Palavras-chave: Aerodinâmica, Análise, AeroDesign, Caracterização, Competição

1 INTRODUÇÃO

O setor de transportes vem observando um aumento exponencial no investimento para o desenvolvimento de meios de transporte cada vez mais eficientes. A eficiência buscada por todas as pesquisas nesse âmbito gira em torno da interação entre o objeto e o meio, ou seja, como o veículo se comunica com o seu meio de propagação. No contexto da aeronáutica, o foco é o aprimoramento de aeronaves que executem suas respectivas missões causando o menor impacto ambiental, vide a aviação de propulsão elétrica em ascensão, otimizando o tempo requerido em tais missões. Dentro disso, há um profundo diálogo entre eficiência e otimização, onde na engenharia muitas vezes esses conceitos aparecem atrelados em um ciclo de trabalho convergente à um ponto. Para a criação de uma nova aeronave, é requerido cada vez mais um conhecimento sólido e uma sequência lógica e metódica para o andamento das atividades desenvolvendo um cuidado especial para a otimização das características desejadas (Barros, 2001). Reduzindo a amplitude dessa discussão, focamos na formação e capacitação dos futuros engenheiros e cientistas responsáveis pelo desenvolvimento tecnológico do nosso passado, presente e futuro.

Nesse contexto, a competição SAE AeroDesign promove entre as equipes participantes a busca pelo refinamento constante de uma aeronave desenvolvida durante o projeto e para tanto, o desenvolvimento de modelos aerodinâmico cada vez mais sólido é fundamental para o sucesso almejado. Nesse contexto, o desenvolvimento de modelos em linguagens de programação ou a utilização de softwares são as principais ferramentas adotadas.

A caracterização aerodinâmica diz respeito à obtenção dos parâmetros fundamentais que traduzem numericamente o comportamento do objeto em estudo. Os coeficientes de sustentação, arrasto e momento, bem como suas interações entre si, são os principais parâmetros buscados, onde cada um destes é usado para avaliar a suficiência do projeto, tomados em comparação aos requisitos definidos na etapa de projeto conceitual.

O projeto aeronáutico é um processo iterativo onde inúmeras variáveis mudam com uma mínima alteração no *layout* atual (Raymer, 2018). Para o desenvolvimento de uma aeronave é necessário a definição e obtenção de parâmetros relacionados aos principais componentes que a compõe como asa e empenagens, chamadas superfícies sustentadoras. Para tanto, a geração das forças de sustentação e arrasto, que são as forças de natureza aerodinâmica atuantes em uma aeronave, deve ser objeto de estudo durante todo o projeto.

Devido ao caráter competitivo da aeronave desenvolvida e utilizada neste trabalho, sendo atribuída um trajeto de voo definido e a superação de um obstáculo na decolagem, é crucial conhecer o comportamento do arrasto sobre ela, para tanto, a polar de arrasto fornece uma visualização da variação do coeficiente de arrasto em função do coeficiente de sustentação.

Ademais, a variação do coeficiente de sustentação em função do ângulo de ataque bem como o coeficiente de momento longitudinal são parâmetros fundamentais que alimentam as análises posteriores de estabilidade e controle, onde são utilizados para o dimensionamento da superfície de controle longitudinal, o profundor.

Além disso, os parâmetros relacionados ao estol da aeronave são requeridos para uma completa caracterização aerodinâmica. A tabela 1 sintetiza os *outputs* objetivo.

Tabela 1. <i>Outputs</i> requeridos na análise		
Parâmetro	Definição	Unidade
$CL\alpha$	Variação do coeficiente de sustentação em função do ângulo de ataque	rad^{-1}
$CL_{\max}$	Coeficiente de sustentação máximo	-
CL_0	Coeficiente de sustentação quando o ângulo de ataque é zero	-
α_{estol}	Ângulo de ataque onde ocorre o estol	$^{\circ}$
CD_0 , CD_1 e CD_2	Polar de arrasto	-
$Cm\alpha$	Variação do coeficiente de momento longitudinal em função do ângulo de ataque	rad^{-1}
Cm_0	Coeficiente de momento longitudinal quando o coeficiente de sustentação é zero	rad^{-1}

Fonte: Autores

2 METODOLOGIA

Para a obtenção dos dados requeridos, foi utilizado dois softwares distintos, o XFLR5 e o DATCOM digital, ambos com abordagens diferentes e suas limitações particulares. Para o objetivo deste trabalho, tais programas foram usados em de forma complementar entre si, buscando os valores mais fiéis de cada abordagem. Em ambos os casos, foi analisado em Reynolds referente a regime de voo reto nivelado e, portanto, foi desconsiderado o efeito solo. Além disso, o intervalo de ângulos de ataque avaliados é -8° e 18° . Os *inputs* relacionados à geometria da aeronave, que constam como as principais condições de contorno estão detalhados nas Fig. 1 e 2. Os perfis aerodinâmicos utilizados foram o *Selig 1223* para a asa, o *Selig 7055* (invertido devido a critérios de estabilidade) para a empenagem horizontal e o *NACA 0015* para a empenagem vertical.

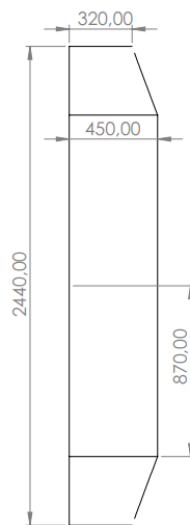


Figura 2 Vista superior das superfícies sustentadoras da aeronave

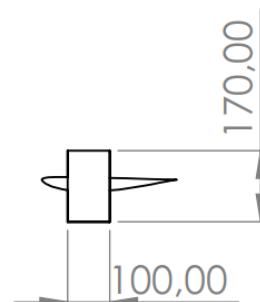
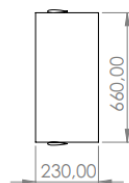


Figura 1 Detalhamento da Empenagem vertical

2.1 SOFTWARE XFLR5

O XFLR5 utiliza o Método dos Painéis (*Painel Method*) para calcular os coeficientes aerodinâmicos de uma aeronave em diferentes condições de voo. Esse método divide a superfície da aeronave em um conjunto de painéis planos e usa uma combinação de cálculos de vórtices e equações matemáticas para obter a distribuição de forças aerodinâmicas em toda a superfície da aeronave. O resultado é um modelo 3D da distribuição de pressão em torno da aeronave.

O XFLR5 é um software de simulação de aerodinâmica de perfil e asa desenvolvido pela Universidade de Munique, na Alemanha, e projetado para ajudar engenheiros aeronáuticos, estudantes e entusiastas de aviação a entender e prever o desempenho de aeronaves. Com uma interface gráfica amigável e diversas ferramentas de análise, o software é amplamente utilizado para a análise de asas, perfis, estabilizadores e fuselagens de aeronaves. Ele permite aos usuários modificar facilmente os parâmetros da aeronave para avaliar diferentes cenários de voo e, assim, otimizar o projeto.

O software utiliza como “motor” da sua análise o XFOIL, criado em 1998 por Mark Drela, que se apresenta como um mecanismo de análise subsônica bidimensional, auxiliando no desenvolvimento da fase inicial dos projetos aeronáuticos. Dentro das limitações do XFLR5, a condição de escoamento invíscido, em análises tridimensionais, tem como consequência direta a não identificação do descolamento da camada limite em regiões de altos ângulos de ataque e, portanto, não é possível identificar o estol das superfícies.

Pela documentação fornecida por seus criadores, consta que além da limitação supracitada o software possui também restrições quanto à estimativa de arrasto, dado que o arrasto retornado na análise tridimensional é resultado de uma interpolação simples da análise bidimensional. Entretanto, o XFLR5 apresenta resultados consistentes para baixos número de Reynolds, configurando como uma ferramenta refinada pra análise aerodinâmica no nível de fidelidade requerido em início de projeto.

2.2 SOFTWARE DATCOM

O *software* é uma versão digital escrita em FORTRAN atualizada do clássico DATCOM (acrônimo de "Digital Datcom"), um programa desenvolvido pela Força Aérea dos EUA nos anos 50 para análise aerodinâmica de aeronaves. Com o DATCOM Digital, os usuários podem calcular rapidamente os coeficientes aerodinâmicos de uma aeronave em diferentes condições de voo, incluindo ângulo de ataque, velocidade, altitude e configuração de superfície de controle. Além disso, o software oferece ferramentas avançadas para modelagem e análise de geometria complexa configurações de superfície móvel. Com recursos poderosos, o DATCOM Digital é uma ferramenta essencial para projetistas de aeronaves e pesquisadores que desejam aprimorar o desempenho e a eficiência de suas aeronaves.

O DATCOM (*Data Compendium*), da Força Aérea Americana, possui uma gama de dados empíricos obtidos por meio de ensaios em voo e túnel de vento como a alguns métodos semiempíricos que foram resultados de uma simplificação de equações para a obtenção dos parâmetros aerodinâmicos de uma aeronave com asa fixa. A manipulação do código de entradas, o qual contém os dados geométricos da aeronave bem como as demais condições de contorno como ângulos de ataque, velocidade (traduzida pelo número de Mach) e altitude, é feita por meio de qualquer editor de texto, nesse trabalho foi utilizado o *Visual Studio Code*. O *software* foi desenvolvido para aeronaves tripuladas e, portanto, ainda é objeto de estudo a sua adequação para a análise de aeronaves da competição SAE Brasil AeroDesign. Entretanto, a aeronave de estudo do atual trabalho encontra-se em conformidade em relação as limitações presentes no programa para a modelagem de superfícies como a asa e a empenagem horizontal bem como para os fatores de estado como número de Reynolds, número de Mach e ângulos de ataque.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Obteve-se, portanto, todos os dados requeridos para a construção das curvas e assim a plena caracterização aerodinâmica da aeronave. Como previsto, o XFLR5, não reconheceu o estol, o mesmo não ocorreu pelo método DATCOM, conforme mostrado na Fig. 3.

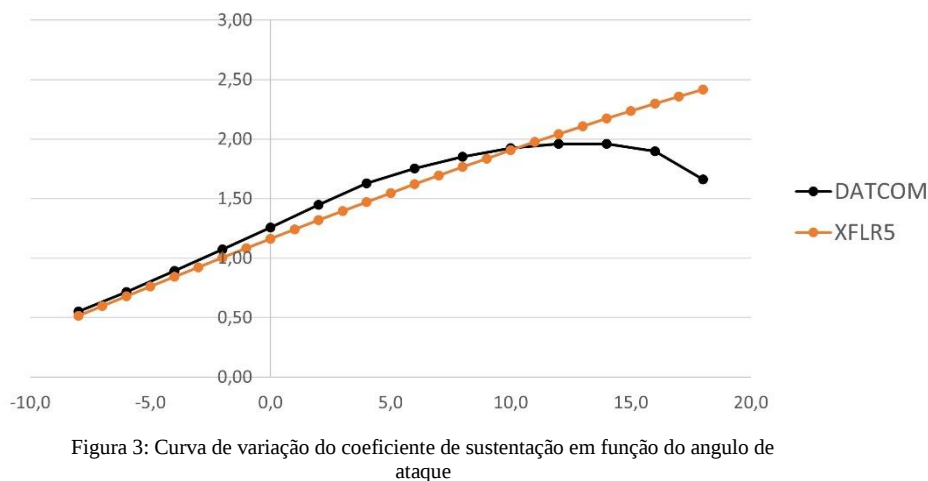


Figura 3: Curva de variação do coeficiente de sustentação em função do ângulo de ataque

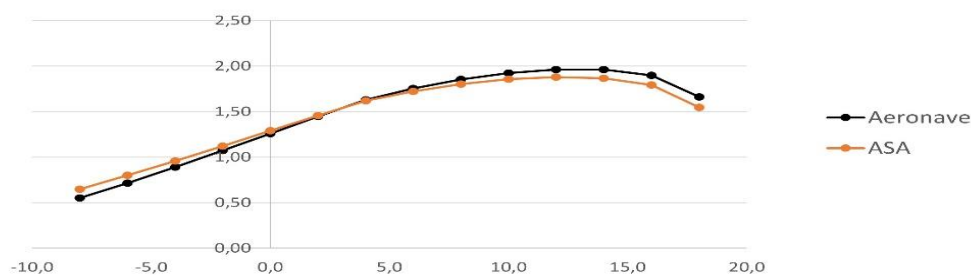


Figura 4: Efeito do estabilizador horizontal na curva de variação do coeficiente de sustentação em função do ângulo de ataque

Foi possível também avaliar por meio do método DATCOM a influência da empenagem horizontal na sustentação da aeronave, uma vez que devido ao perfil invertido (critério de estabilidade) há, portanto, em uma faixa de ângulos de

ataque, um somatório de forças em sentidos contrários. A Fig. 4 ilustra o efeito da compensação de sustentação na asa pelo estabilizador horizontal.

Para a manutenção da eficiência aerodinâmica da aeronave, é recomendável que a perda de sustentação devido aos efeitos das empenagens seja o menor possível, uma vez que o sucesso de um projeto Aerodesign é garantir um voo com maior carga e, portanto, a geração de sustentação deve ser a máxima possível em todo o decorrer do projeto. A variação da eficiência aerodinâmica é mostrada na Fig. 5.

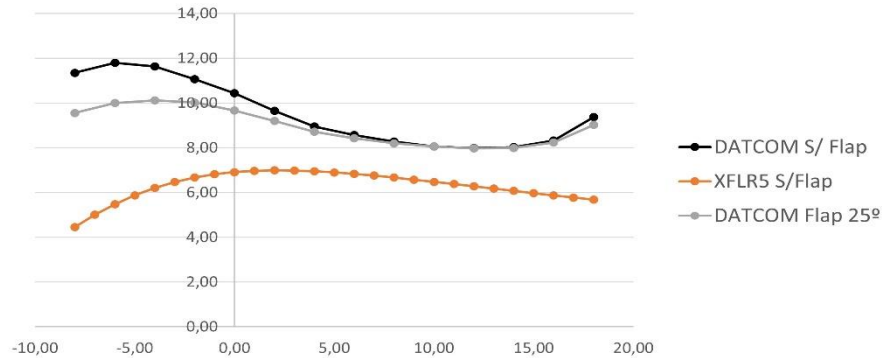


Figura 5: Variação da eficiência aerodinâmica

Após a avaliação dos termos referentes à sustentação, buscou-se obter os parâmetros relacionados ao arrasto e a influência dos dispositivos hiper sustentadores. Verificou-se a variação do efeito do *flap* em distintas deflexões. Com isso, observou-se pela Fig. 6 que não há diferença efetiva entre 25° e 30° e devido a isso adotou-se a menor deflexão conferindo em menor esforço ao servo motor e diminuindo, por conseguinte, a possibilidade de falha em operação.

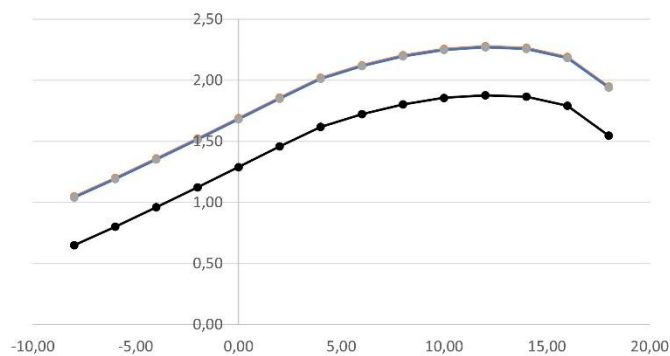


Figura 6: Efeito da deflexão do *flap* na curva de variação do coeficiente de sustentação em função do ângulo de ataque

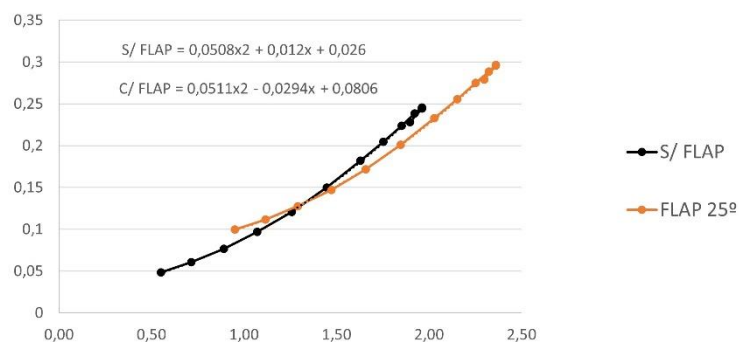


Figura 7: Polar de arrasto

Ademais, a contribuição do *flap* no arrasto da aeronave é um fator altamente relevante para as análises posteriores e, portanto, deve ser computado com precisão. Devido a isso, pela polar de arrasto é possível ver de forma clara o comportamento da variação do arrasto em cada configuração, com e sem *flap*, como mostrado na Fig. 7.

Por fim, foi sintetizado todos os dados obtidos pela análise na tabela 2 e 3:

Tabela 2. *Outputs* da análise

Parâmetro	DATCOM	XFLR5	Unidade
CL α	4,816	4,536	rad ⁻¹
CL _{max}	1,962	-	-
CL ₀	1,258	1,162	-
α_{estol}	14	-	°
CD ₀ , CD ₁ e CD ₂	0,0508; 0,012; 0,026	0,058; -0,013; 0,102	-
Cm α	-0,006	-0,028	rad ⁻¹
Cm ₀	-0,388	-0,019	rad ⁻¹

Fonte: Autores

Para a aeronave com *flaps* acionados obteve-se:

Tabela 3. *Outputs* da aeronave com *flaps* acionados em 25°

Parâmetro	DATCOM	Unidade
CL α	5,059	rad ⁻¹
CL _{max}	2,362	-
CL ₀	1,658	-
α_{estol}	13,00	°
CD ₀ , CD ₁ e CD ₂	0,051; -0,029; 0,080	-
Cm α	-0,006	rad ⁻¹
Cm ₀	-0,688	rad ⁻¹

Fonte: Autores

4 CONCLUSÃO

Verificou-se que a aeronave projetada atende de forma satisfatória aos requisitos de projeto e, portanto, a partir dos resultados obtidos é possível dar continuidade as demais análises da aeronave como dimensionamento das superfícies de controle bem como a obtenção das derivadas aerodinâmicas finalizando em sua simulação dinâmica. Além disso, com os dados obtidos é possível prosseguir para a determinação dos carregamentos aplicados na estrutura da aeronave e assim realizar o dimensionamento de componentes fundamentais como as longarinas das superfícies e sistema de pouso e decolagem como as rodas e trem de pouso avaliando para os respectivos estados críticos. Dessa maneira, com a plena execução das análises posteriores é possível dar início à construção do protótipo e consequentemente convergir em uma aeronave competitiva e capaz de alcançar bons resultados.

5 REFERÊNCIAS

- Barros, C. P., 2001, Uma metodologia para o desenvolvimento de projeto de aeronaves leves e subsônicas.
XFLR5, 2005, disponível em <<http://www.xflr5.tech/xflr5.htm>>
Dantas, A. F. M, 2014, Análise aerodinâmica de perfis de asa para veículos aéreos não tripulados usando o *software* XFLR5.
Raymer, D. P. 2018, *Aircraft design: a conceptual approach*. AIAA Education series.
da Silva, A.L., Neto, O., dos Santos, K. M., 2019 Uso do USAF DATCOM como método de análise de estabilidade para aeronaves de competição SAE AeroDesign.
Drela, M., 1989 ,“XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils,” in *Low Reynolds Number Aerodynamics*.
Anderson, John David. 2011, *Fundamentals of Aerodynamics*.
Finck, R. D. USAF (United States Air Force) Stability and Control DATCOM. Air Force Wright Aeronautical Laboratories, 1960 (Revised 1978).

6 RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

TÉCNICAS DE PROGRAMAÇÃO EM PYTHON PARA A ANÁLISE DE REVERSÃO NOS COMANDOS

João Pedro Moraes Pereira, joaop.1000350@gmail.com¹

Vinicius Mateus Moura Lima, vmateusmouralima@ufpi.edu.br²

Vinicius José Aragão de Almeida Barrozo, viniciusjose05@ufpi.edu.br³

¹Universidade Federal do Piauí-UFPI
Campus Universitário Ministro Petrônio Portella

Resumo: Este resumo descreve a aplicação de métodos de programação em Python para a análise de reversão de comandos de uma aeronave. A equipe Delta do Piauí utilizou esses métodos para otimizar os processos necessários, tornando-os mais precisos e rápidos. O estudo baseou-se em cálculos obtidos a partir de literatura especializada sobre o tema. Foram apresentados conceitos de aeroelasticidade e o comportamento dos comandos de uma aeronave rádio controlada, com o objetivo de aplicar os programas criados na análise dos comandos dessas aeronaves, considerando a geometria e as condições de voo. Durante o processo, foram comparados dados usando as equações que foram adaptadas do Excel, onde eram antes feitos os cálculos, para python usando os mesmos parâmetros e dados como base a análise de reversão do Ronin, aeronave projetada pela equipe, e os mesmos foram utilizados para testar a validade dos programas desenvolvidos. Os programas foram divididos em três partes, divergências, velocidades de reversão dos comandos e as efetividades dos mesmos, incluem nos programas parâmetros como rigidez torcional, velocidade, densidade do ar, sustentação da asa em voo, envergadura e corda da superfície submetida a deformação, além de análises gráficas feitas pelos programas, com os dados comparados compatíveis podendo assim validar a eficiência dos programas que foram desenvolvidos.

Palavras-chave: reversão, cargas, aeroelasticidade

1 INTRODUÇÃO

Aeroelasticidade é uma área da mecânica sólida que estuda o comportamento das estruturas flexíveis sob ação de forças aerodinâmicas, especialmente em aplicações aeroespaciais (Fung & Tong, 2001), “As forças aerodinâmicas instáveis desempenham um papel fundamental na análise dos fenômenos aeroelásticos. Em geral, essas forças surgem de perturbações no campo de fluxo em torno de uma estrutura e fazem com que a estrutura desvie ou vibre de uma maneira que depende da frequência e amplitude da perturbação e das propriedades da própria estrutura.” (Bisplinghoff, Ashley e Halfman *et al*, 1996). A aeroelasticidade é uma área crucial para o projeto e o desenvolvimento de aeronaves, pois busca garantir a segurança, a eficiência e o desempenho desses veículos em diferentes condições de voo.

Para isso, é necessário considerar aspectos como a geometria da aeronave, as propriedades dos materiais utilizados na construção e os diferentes tipos de cargas a que a aeronave estará sujeita durante o voo, além disso, aeroelasticidade também está preocupada com o estudo dos controles de voo e sua efetividade em diferentes condições, como cargas assimétricas e deformações da asa. Essas informações são cruciais para a otimização dos sistemas de controle de voo e a maximização do desempenho da aeronave.

Tendo isso em vista, temos que os comandos de uma aeronave sofrem de diversos fenômenos aeroelásticos, “Carga estática de equilíbrio, estabilidade estática e controle, bem como aeroelasticidade, estão entre as muitas questões relacionadas ao desempenho e controle das aeronaves.” (Nelson, 2019), sendo assim, a estabilidade e o controle adequados de uma aeronave são fundamentais para garantir a segurança e o desempenho durante as operações de voo (Cook, 2001).

Neste contexto, um dos fenômenos mais estudados na aeroelasticidade é a reversão nos comandos, que ocorre quando a deflexão de um controle produz um movimento oposto ao esperado. Conforme (Wright e Cooper, 2007) “um caso crítico em que o efeito devido à rotação do controle, isoladamente do efeito de incidência da raiz, uma torção do nariz para baixo resultará de um aumento do ângulo de controle ou pressão dinâmica. A elevação por unidade de extensão devido apenas à rotação do controle” é um dos fenômenos relacionados a reversão dos comandos. Para minimizar ou eliminar esse fenômeno, engenheiros estabelecem protocolos para avaliar os fenômenos e utilizam diferentes técnicas, como mudanças na geometria da aeronave, uso de compensadores ou superfícies móveis, e sistemas hidráulicos ou elétricos (Ashley & Landahl, 2006). As superfícies de controle de uma aeronave são as partes móveis

que permitem ao piloto controlar a atitude (posição angular) e movimento da aeronave em voo. Neste resumo os comandos analisados foram o Aileron que controla o movimento lateral da aeronave a partir da asa, o Leme que controla este movimento a partir da cauda e o Profundor que controla o movimento longitudinal da aeronave a partir da cauda.

Além disso, aeroelasticidade também está preocupada com o estudo dos controles de voo e sua efetividade em diferentes condições, como cargas assimétricas e deformações da asa (Hodges & Pierce, 2011), as efetividades aeroelásticas referem-se à medida em que as deflexões dos controles afetam as cargas estruturais e a dinâmica da aeronave (Dowell, 2019). A geometria das superfícies de controle, a rigidez estrutural, as características do fluido ao redor da aeronave e as propriedades do sistema de controle são alguns dos fatores que influenciam as efetividades aeroelásticas (Hodges & Pierce, 2011). Elas são usadas para projetar e analisar a resposta aeroelástica de uma aeronave em diferentes condições de voo. “As forças aerodinâmicas efetivas e os deslocamentos elásticos são usados para descrever a resposta aeroelástica de uma estrutura. As forças aerodinâmicas são as forças que produziram a mesma deformação em uma estrutura rígida que as forças aerodinâmicas reais produzem na estrutura flexível. Os deslocamentos elásticos são os deslocamentos que ocorreriam em uma estrutura sem forças aerodinâmicas aplicadas, mas submetidas às mesmas cargas que a estrutura flexível. Os deslocamentos reais são chamados de efetividade estrutural. Determinar essas efetividades é uma etapa chave no processo de análise aeroelástica.” (Wright e Cooper 2007, p. 48).

Para definir efetividades podemos usar Eq.(1).

$$Cn\delta = \frac{\Delta Cn}{\Delta \delta} \quad (1)$$

Onde ΔCn é a variação na força aerodinâmica produzida pela deflexão do controle; $\Delta \delta$ é a deflexão do controle.

Também deve se levar em consideração a influência da distribuição de carga e da deformação da estrutura na efetividade dos controles, e fórmulas para calcular as efetividades em condições de carga assimétrica e deformação da asa, como exemplo a velocidade de reversão que é definida como a rapidez com que uma estrutura aerodinâmica retorna à sua forma original após sofrer uma deformação elástica causada por uma força aerodinâmica. É uma medida da taxa na qual a estrutura recupera sua forma original após sofrer uma deformação elástica. A velocidade de reversão é importante na avaliação da estabilidade e do desempenho das estruturas aerodinâmicas, como asas de aeronaves.

2 METODOLOGIA

Os programas foram baseados em adaptar as equações usadas na planilha do Excel, importando as bibliotecas da linguagem Python que correspondem os resultados da planilha, foi observado também que se faria necessário para a análise de reversão programas para análise de divergência, dividindo o projeto em três programas diferentes que referenciam uns aos outros como variáveis de entrada, de início ao acessar a planilha de aeroelasticidade do Ronin, foi retirada das células de velocidade e carga de divergência as equações e os dados das variáveis do cálculo para teste, logo após foi feita a adaptação para Python, assim como para a velocidade de reversão, foram feitos testes com o código durante todo o processo, quando não compatíveis os resultados foram feitas as correções necessárias, para efetividades foi realizada uma pesquisa de como adaptar a função que melhor correspondia ao gráfico da planilha, por meio de testes encontrada a melhor maneira de adaptar o gráfico e assim obter o resultado esperado, podemos detalhar assim o funcionamento de cada um dos programas separadamente.

2.1 Velocidade e Carga de Divergência

O código foi criado adaptando a Eq.(2) baseada a partir (Wright e Cooper, 2007) para a linguagem com a biblioteca que realiza cálculos matemáticos *math*, consistindo em solicitar ao usuário que insira valores das variáveis de entrada usadas na equação que são rigidez torcional (GJ), o coeficiente de sustentação (a), a densidade do ar (ρ), a área da superfície alar (S), a porcentagem do bordo de fuga (bf), a envergadura para velocidade (eV).

$$VD = \sqrt{((Gj \cdot 2)/a/\rho/S/0.75 \cdot bf/2/eV)} \quad (2)$$

Para calcular QD , é utilizada outra equação Eq.(3) que adiciona as variáveis da envergadura (eQ) já que foi observado nos dados que existem casos em que a envergadura a ser considerada na superfície em relação a de velocidade de divergência é diferente, o comprimento da corda (c), a largura (b).

$$VD = 3 \cdot Gj/eQ/(c2)/((b/2)2)/a \quad (3)$$

Por fim fazemos com que o programa exiba na tela os resultados para VD e QD .

2.2 Velocidade de Reversão

Para o cálculo da velocidade de reversão seguimos o mesmo princípio, usando variáveis de entrada inseridas pelo usuário o programa a usando a Eq. (4), as variáveis requeridas são o menor valor da derivada aerodinâmica ($mea2$), o maior valor de $a1(meal)$, o maior valor de $k2(mk2)$, a área da superfície alar, a corda da superfície e a rigidez torcional.

$$VR = \sqrt{(-2 \cdot mea2/ma1/mk2/S/COO/c)} \text{ onde, } COO = 1/Gj \quad (4)$$

2.3 Efetividades

Para as efetividades das superfícies de controle, foi criado um programa de análise gráfica, o código começa importando uma biblioteca *matplotlib* que habilita plotar gráficos com o programa, em seguida, definindo uma sequência de números inteiros que representam as velocidades de voo como variável, após criar uma lista vazia fazemos com que o programa solicite que o usuário digite um valor de velocidade de reversão. A seguir, definida pela função Eq. (5) o código vai plotar o gráfico, que irá ser exibido na tela logo após compilar.

$$y = 1 - (z/VR)^2 \quad (5)$$

Onde y define as efetividades numéricas que serão plotadas no gráfico.

3 CONCLUSÃO

O programa foi testado utilizando os dados de entrada da aeronave Ronin da Equipe Delta do Piauí. A fim de validar os resultados do programa são comparadas as saídas dele com um modelo em Excel que segue a mesma metodologia e foi utilizado durante a edição 2022 da competição SAE Brasil Aerodesign.

Na Tabela 1 são dispostas as velocidades e cargas de divergência da aeronave para cada estrutura analisada, calculadas em Python e Excel.

Tabela 1. Velocidades e Cargas de divergência para cada estrutura.

	Longarina Principal da asa	Longarina secundária da asa	Longarina da EH	Longarina da EV
VD Excel (m/s)	116,79	8,71	325,57	11,43
VD do programa (m/s)	116,94	8,71	325,56	11,43
QD Excel (N/m ²)	48957,54	8409,55	229320,20	1499,79
QD do programa (N/m ²)	48957,54	8409,57	229320,20	1499,79

Com as variáveis de divergência calculadas, segue então para o calculo das velocidades de reversão na Tab. 2.

Tabela 2. Velocidades de Reversão para cada superfície de controle.

	Leme	Aileron	Profundor
VR do projeto (m/s)	188,05	72,97	90,77
VR do programa (m/s)	188,27	72,88	90,77

As efetividades então plotadas de forma gráfica nas Figuras 1 e 2.

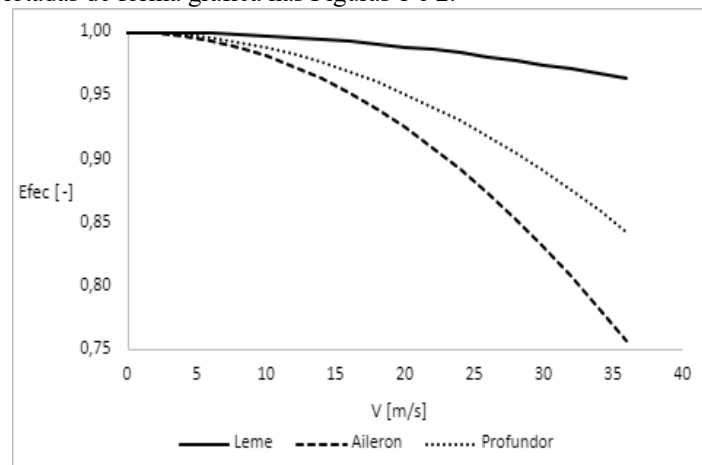


Figura 1. Gráfico das Efetividades de cada comando em função da Velocidade no Excel.

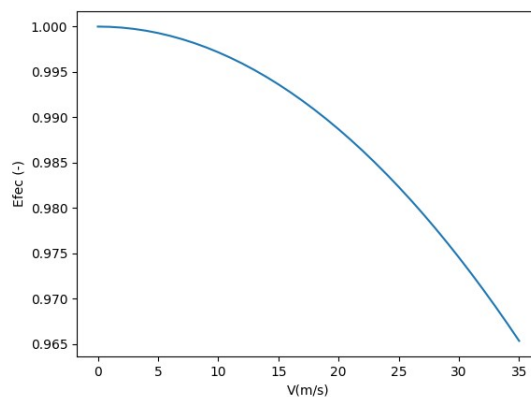


Figura (a)

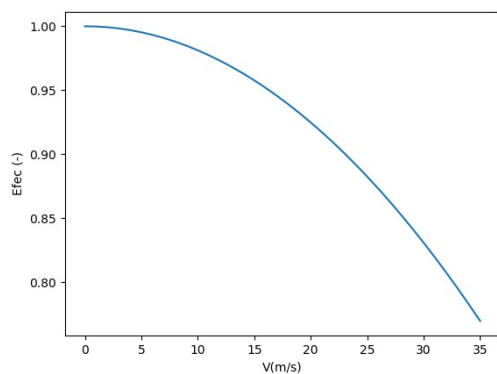


Figura (b)

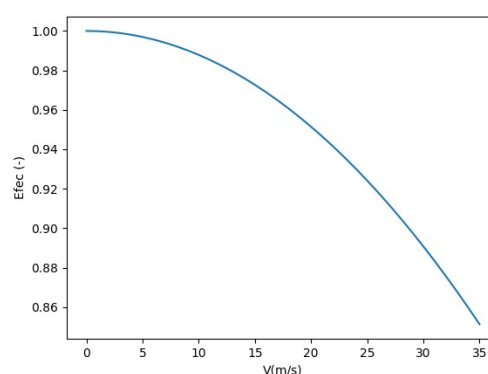


Figura (c)

Figura 2. Gráfico das Efetividades de cada comando em função da Velocidade no programa desenvolvido.

Comparando os resultados dos dois métodos, é visto uma pequena diferença, a qual valida utilizar o programa em python no lugar do antigo modelo em Excel, dando maior agilidade nos resultados e permitindo maior integração com a biblioteca da equipe de códigos em Python, a análise mostra que a efetividade dos comandos diminui a medida que a velocidade de voo aumenta entre 1 e 36 metros por segundo, plotando no gráfico a análise numérica adimensional das efetividades de maneira similar para todos, porém com uma leve variação na perda de efetividade sendo maior para o comando com velocidade de reversão maior no caso sendo o leme, de forma que o comando levado a este caso crítico pode causar uma resistência da aeronave a realizar manobras de voo, tendo isso em vista devemos trabalhar diante dessa margem, como já era mostrado pelos dados analisados no Excel, com o Python podemos observar as efetividades para diversas velocidades de voo e de reversão mais rapidamente, dado que esses parâmetros irão mudar para as próximas aeronaves da equipe.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bisplinghoff, R. L., Ashley, H., & Halfman, R. L. (1996). Aeroelasticity. Addison-Wesley.
- Wright, P. H. (2007). "Introduction to Aircraft Aeroelasticity and Loads Wright and Cooper".
- Ashley, H., & Landahl, M. (2006). Aeroelasticity: The Continuum Theory. Dover Publications.
- Hodges, D. H., & Pierce, G. A. (2011). Introduction to Structural Dynamics and Aeroelasticity. Cambridge University Press.

Dowell, E. H. (2019). Aeroelasticity of Plates and Shells. CRC Press.

Matplotlibexamples, Copyright (2002–2012) itJohn Hunter, Darren Dale, Eric Firing, Michael Droettboom and the Matplotlib development team.

Nelson, R. C. (2019). Flight Stability and Automatic Control. McGraw-Hill Education.

Cook, M. V. (2001). Flight Dynamics Principles: A Linear Systems Approach to Aircraft Stability and Control. Butterworth-Heinemann.

Fung, Y. C., & Tong, P. (2001). Classical and Computational Solid Mechanics. World Scientific Publishing Co.

Regulamento 25 competição SAE Brasil Aerodesign, Comissão Técnica SAE (2023)

5 RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

AValiação DO DESGASTE DE FLANCO DE FERRAMENTAS DE AÇO RÁPIDO NO TORNEAMENTO A SECO DO AÇO ABNT 1045

George Lucas da Silva Oliveira Soares, georgelucas23.gl@gmail.com¹

Iago Lucas Martins Meneses, iagolucas@hotmail.com.br¹

Patrick Abreu de Oliveira, patrick@ufpi.edu.br¹

Raphael Lima de Paiva, raphaellimap@ufpi.edu.br¹

¹Universidade Federal do Piauí - UFPI

Resumo: No desenvolvimento das operações de manufatura busca-se sempre a obtenção de processos cada vez mais eficientes de forma que possam diminuir os custos e o tempo total de fabricação. As análises do desenvolvimento do desgaste das ferramentas utilizadas nestes processos são de vital importância, onde buscam-se parâmetros que permitam controle do desgaste de forma precisa prolongando assim a sua vida útil. Sendo assim este trabalho relata as implicações da variação dos parâmetros de usinagem na operação de torneamento do aço ABNT 1045 no desgaste de flanco de ferramentas de aço rápido. Os ensaios foram realizados em diferentes condições de avanço (f) (0,1138, 0,1172 e 0,2784 mm/rev) e profundidades de corte (a_p) (0,25, 0,50 e 0,75 mm). As medições de desgaste da ferramenta foram realizadas a cada 25 mm de comprimento usinados na direção de avanço. Os principais resultados revelam que o aumento do avanço e profundidade de corte promovem um maior desgaste da ferramenta.

Palavras-chave: Torneamento, Avanço, Profundidade de corte, Desgaste, Corrente elétrica.

1 INTRODUÇÃO

Dentre as variedades de matérias primas utilizadas na indústria atualmente, o aço destaca-se como um material importante para o funcionamento da economia, sendo ele um ponto de partida para diversas cadeias produtivas, levando em consideração a sua aplicação em setores automobilísticos, industriais e civis (Naitzke et al, 2019).

A usinagem dos metais por sua vez destaca-se, segundo Childs et al. (2000), como um dos processos de fabricação mecânica mais utilizado nas indústrias, que conforme Sousa et al. (2012) está em constante inovação e os recentes avanços das máquinas e ferramentas estão gerando uma busca permanente por melhorias, objetivando uma redução de custos e aumento de produtividade.

Shaw (2005) relata que uma maior precisão obtida no produto final e uma maior taxa de produção para uma variedade de ferramentas disponíveis como características do processo de usinagem. No entanto, para que exista sucesso no processo de usinagem, é necessário atentar para diversos fatores que exercem influência na superfície usinada, que inclui, dentre outros, parâmetros de corte e o desgaste da ferramenta de corte.

Machado et al. (2015) nos lista ainda 3 fenômenos de perda de eficácia da ferramenta de corte, sendo eles: avaria, que de forma inesperada e repentina, pode levar a quebra da ferramenta; desgaste, que define a mudança na geometria original devido a perda gradual de material, sendo consequência de vários mecanismos; e a deformação plástica, que é a mudança de geometria da aresta de corte devido ao deslocamento de material.

Segundo Machado e Diniz (2017), a vida de uma ferramenta de corte depende principalmente da taxa de desgaste, e o desgaste de flanco se destaca como um dos principais pontos a serem estudados e analisados. Sendo assim, Machado (2018) nos informa que a análise dos parâmetros de entrada utilizados nos processos influencia diretamente nas variáveis de saída como também nos esforços de corte, Chiaverini (1996) relata ainda que a vida útil da ferramenta, as forças de corte, velocidade de avanço, condições de corte, geometria e raio da ponta da ferramenta são fatores que devem ser levados em consideração no momento de definição da qualidade superficial da peça.

Neste sentido, e sabendo da importância de analisar o desgaste de ferramentas de corte no processo de usinagem, este trabalho tem como foco analisar de forma experimental a evolução do desgaste de flanco máximo de uma ferramenta de aço rápido durante o processo de torneamento cilíndrico externo para diferentes parâmetros de avanço e profundidade de corte.

2 METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido de forma experimental através do processo convencional de torneamento cilíndrico externo em um torno mecânico horizontal Veker, modelo TVK-1660ECO, equipado com um motor elétrico trifásico com potência nominal de 3,36 kW. O material torneado nos ensaios foi o aço ABNT 1045, com dimensões de 100 mm de comprimento e 49,50 mm de diâmetro externo. Na Tabela 1 é apresentada a composição química do aço ABNT 1045 conforme NBR 87:2000 (2000).

Tabela 1. Composição química do aço ABNT 1045 (NBR 87:2000, 2004).

Classificação ABNT/SAE/AISI	Carbono (C) %	Manganês (Mn) %	Fósforo (P) % máx.	Enxofre (S) % máx
1045	0,43-0,50	0,60-0,90	0,04	0,05

As ferramentas de corte utilizadas nos ensaios de torneamento foram bits de aço rápido com seções transversais de 4 3/8 de polegadas, afiados com a seguinte geometria: ângulo de saída de 0°, ângulo de posição principal de 75°, ângulo de posição secundário de 15° e ângulo de folga de 8°. A Figura 1 ilustra o posicionamento utilizado para o ensaio de torneamento cilíndrico externo das amostras.

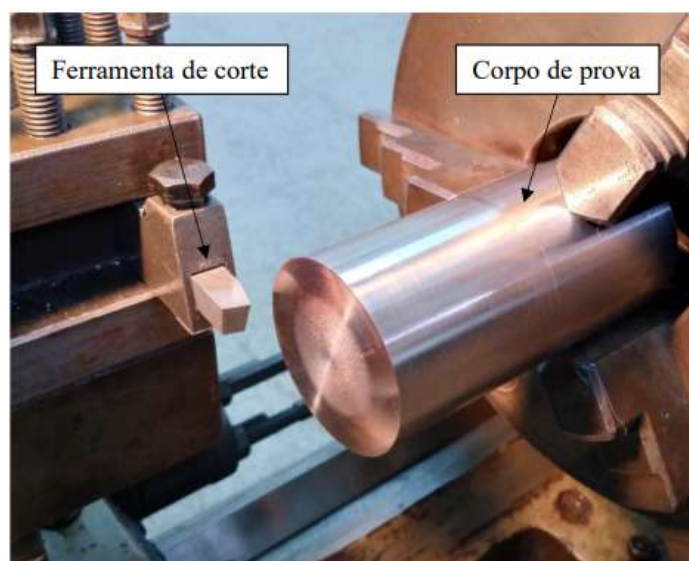


Figura 1. Configuração da máquina-ferramenta para os ensaios de torneamento cilíndrico externo.

Como parâmetros de corte, foram fixados os valores de velocidade de rotação das amostras à 215 rpm, o que resulta em uma velocidade de corte (v_c) de 33 m/min, constante para todos os ensaios. Nove diferentes condições de corte foram testadas pela variação de três níveis de avanço e três níveis de profundidade de corte, conforme especificado na Tabela 2.

Tabela 2. Plano de trabalho experimental.

Ensaio	Avanço f (mm/rev)	Profundidade de corte a_p (mm)
1	0,1138	0,25
2		0,50
3		0,75
4	0,1772	0,25
5		0,50
6		0,75
7	0,2784	0,25
8		0,50
9		0,75

Cada ensaio baseou-se na usinagem a seco (sem aplicação de fluidos de corte) em intervalos de 25 mm para avaliação da evolução do desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$). Como critério de parada, empregou-se 100 mm usinados na direção de avanço ou um desgaste de flanco máximo de 0,6 mm conforme sugerido pela norma NBR ISO 3685 (2017).

A medição do desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$) foi realizada na superfície principal de folga da ferramenta de corte, com auxílio de um microscópio digital Andonstar, modelo AD106S, com capacidade de ampliação de 220 vezes, Figura 2(a). Foram realizadas 3 medições para cada imagem registrada obtendo-se assim valores de medição mais

confiáveis. Um exemplo da estratégia utilizada para medir o desgaste de flanco máximo da ferramenta é apresentado na Figura 2(b).

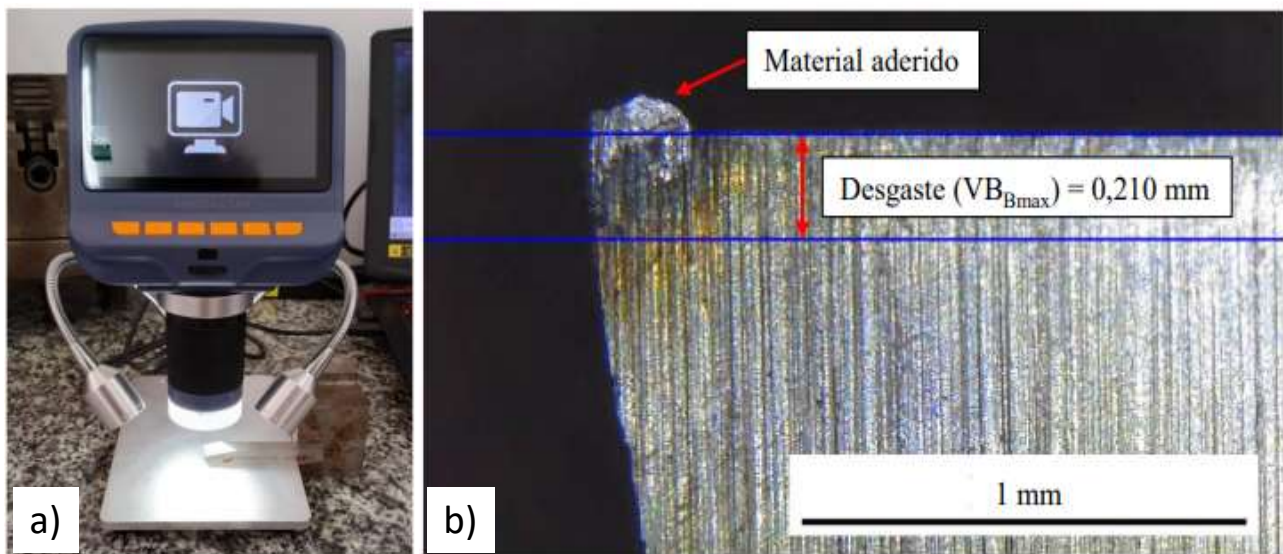


Figura 2. (a) Microscópio Andonstar, modelo AD106S. (b) Exemplo de medição de desgaste e escala para medição.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 3 são mostradas as curvas de desgaste de flanco máximo da ferramenta em função do comprimento usinado para as condições de corte testadas neste trabalho.

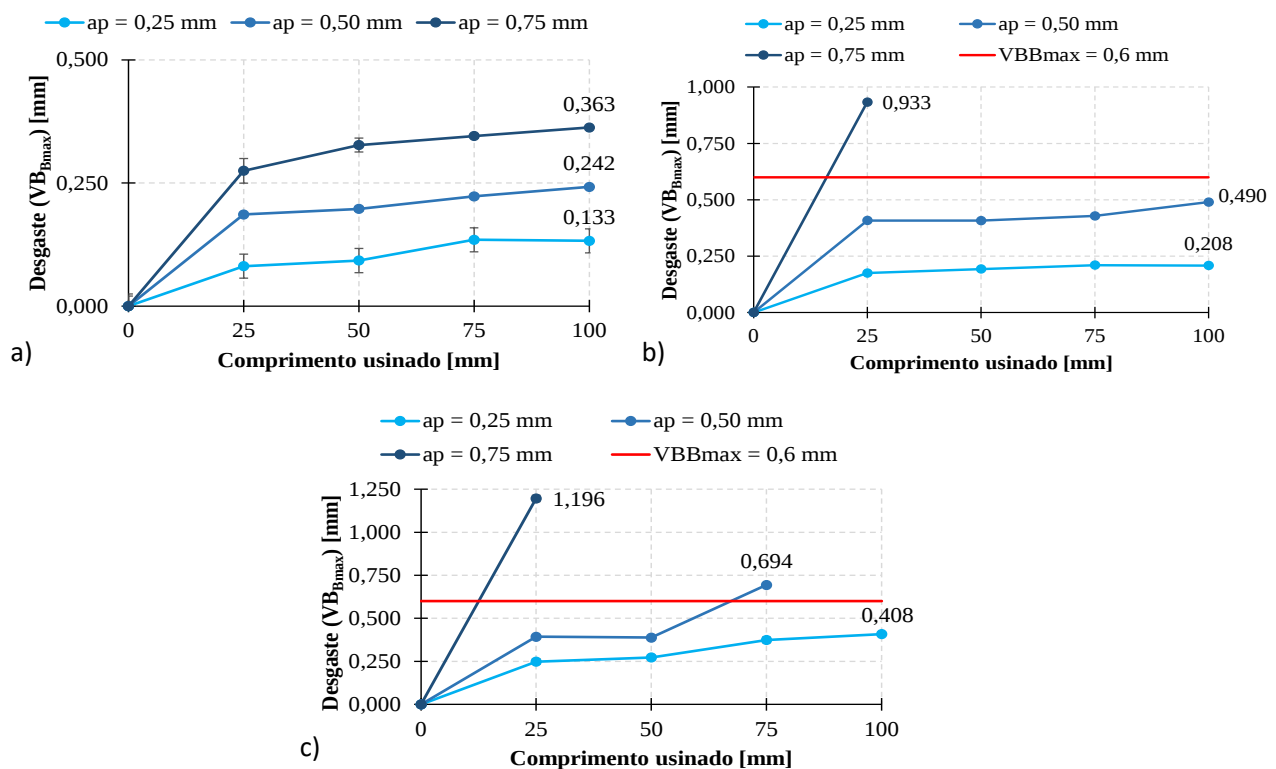


Figura 3. Curvas de desgaste experimental para (a) $f=0,1138$ mm/rev, (b) $f=0,1772$ mm/rev e (c) $f=0,2784$ mm/rev.

Conforme pode ser observado na Figura 3, a evolução das curvas de desgaste com o comprimento usinado apresenta um comportamento semelhante à curva padrão de desgaste de uma ferramenta conforme apresentado por Machado et al. (2015). Segundo os autores, o desgaste pode ser dividido em 3 estágios, a saber: estágio I, se desenvolve no início do corte evoluindo de forma crescente, se “acomodando” ao sistema, marcado por uma inflexão no seu fim. Depois o desgaste evolui de forma constante, após a adequação da ferramenta, até atingir uma nova inflexão, caracterizando o estágio II. No

estágio III o desgaste acelera de forma abrupta em um curto espaço de tempo, onde eventualmente ocorreria o colapso da ferramenta.

Dentre as situações propostas neste trabalho, é possível observar pela Figura 3(a) apenas os estágios I e II das curvas de desgaste, diferentemente da condição $f = 0,2784$ mm/rev e $a_p = 0,50$ mm, ilustrada na Figura 3(c), onde nota-se uma linearidade na taxa desgaste para o intervalo de 25 e 50 mm de comprimento usinado, característica do estágio II, diferentemente do intervalo de 50 e 75 mm de comprimento usinado, onde ocorre uma elevada acentuação da curva, sugerindo, assim, o estágio III.

Ainda da Figura 3, nota-se que com o aumento da profundidade de corte (a_p), o desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$) da ferramenta também aumenta, o mesmo pode ser observado para o aumento dos valores de avanço (f). Para $f = 0,1138$ mm/rev, considerando a variação de $a_p = 0,25$ mm para $a_p = 0,50$ mm há um aumento de 82% no valor do desgaste, para os 100 mm de comprimento usinado na direção de avanço. Considerando o aumento de $a_p = 0,25$ mm para $a_p = 0,75$ mm, o aumento no desgaste da ferramenta de corte foi de 173%. Considerando $f = 0,1772$ mm/rev, o desgaste máximo de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$) apresentou um aumento de 135,6% quando a profundidade de corte aumentou de 0,25 mm para 0,50 mm.

Os parâmetros de $f = 0,1772$ mm/rev com $a_p = 0,75$ mm e $f = 0,2784$ mm/rev com $a_p = 0,50$ mm e $a_p = 0,75$ mm, ilustrados respectivamente nas Figura 3 (b) e Figura 3 (c) podem ser definidos como parâmetros de corte severos, onde os valores de desgaste máximo de flanco ($VB_{Bmáx}$) ultrapassaram o valor de 0,6 mm, sugerido pela NBR ISO 3685 (2017) como critério para o fim de vida de uma ferramenta de corte, antes dos 100 mm de comprimento usinado. Na Figura 3(a), os parâmetros de corte utilizados caracterizam uma condição de corte menos severa, se comparados com as demais condições, visto que nenhuma ferramenta atingiu o limite de desgaste de flanco máximo conforme sugerido pela norma (0,6 mm).

Valores mais elevados de avanço e profundidade de corte promovem um aumento na taxa de remoção de material e, consequentemente, aumentam os esforços de corte e temperatura na interface entre a ferramenta de corte e a peça usinada, afetando a resistência ao desgaste da ferramenta de corte além de causar alterações na superfície e dimensão das amostras. (Beddoes e Bibby, 1999). Diniz et. al. (2009) relatam ainda que o aumento no avanço gera um aumento na quantidade de calor imputada ao processo, aumentando também a área da ferramenta submetida a este calor, influenciando negativamente na vida da ferramenta.

4 CONCLUSÃO

Através da análise dos dados obtidos pelos ensaios realizados neste trabalho, pode-se concluir que:

- O desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$) da ferramenta em função do comprimento usinado apresentou comportamento dentro do esperado principalmente para condições de corte mais brandas (menores valores de avanço e profundidade de corte), isto é, um desgaste acentuado inicialmente (nos primeiros 25 mm de comprimento usinado) seguido de um desgaste com taxa praticamente constante.
- A utilização de maiores valores de avanço e/ou profundidade de corte aumentaram o desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$) da ferramenta de corte. Para o menor avanço ($f = 0,1138$ mm/rev), por exemplo, o aumento na profundidade de corte de 0,25 mm para 0,75 mm aumentou o desgaste de flanco máximo em 173% após 100 mm de comprimento usinado na direção de avanço.
- A aplicação de $a_p = 0,75$ mm com avanços de 0,1772 mm/rev e 0,2784 mm/rev é inadequada considerando as condições utilizadas neste trabalho, uma vez que a ferramenta de corte apresentou desgaste de flanco máximo superior à 0,6 mm após o primeiro passe (25 mm de comprimento usinado na direção de avanço).

5 REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 3685: Ensaio de vida de ferramenta de ponta única para torneamento. Rio de Janeiro, 2017.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 87:2000: Aço carbono e ligados para construção mecânica - Designação e composição química. Rio de Janeiro, 2000.
- Beddoes, J.; Bibby, M. J. Principals of Metal Manufacturing Processes. 1ª ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 1999.
- Childs, T.; Maekawa, K.; Obikawa, T.; Yamane, Y. Metal Machining: Theory and Applications. 1ª ed. Londres: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- Diniz, A. E.; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L. Tecnologia da Usinagem dos materiais. São Paulo: MM Editora, 2009.
- Ferraresi, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. 1ª ed. [S. l.]: Edgard Blucher LTDA, 1977.
- Machado, A. R.; Abrão, A. M.; Coelho, R. T.; Da Silva, M. B. Teoria da Usinagem dos Metais. 3ª ed. São Paulo: Blucher, 2015.
- Machado, Á.R., Diniz, A.E. Análise de desgaste de ferramentas na usinagem de aços endurecidos. Int J Adv Manuf Technol 92, 4095–4109 (2017).
- Machado, G. de O. V. Análise das forças de usinagem no torneamento de diferentes materiais. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Mecânica) - CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2018.

- Naitzke, D. A. C.; Barrionuevo, G.; Nardin, L. V.; Silva, R.; Pereira, R. L.; Leite, S. S. Análise da rugosidade superficial do aço sae1020 no processo de torneamento. Revista Engenharia em Ação UniToledo, Araçatuba, SP, v. 04, n. 02, p. 81-95, jul./dez. 2019.
- Sousa, L. F.; Souza, J. V. C.; Santos, C.; Silva, O. M. M.; Machado, J. P. B.; Avila, R. F. Influência da Velocidade de Corte na Usinagem do Ferro Fundido Nodular Utilizando Ferramentas Cerâmicas de Alumina. Cadernos UniFOA, v. 7, n. 2, p. 45-51, dez 2012.
- Shaw, M. C. Metal Cutting Principals. 2ª ed. Nova York: Oxford University Press, 2005.

6 RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ANÁLISE MORFOLOGICA DE NANOTUBOS DE TiO_2 SINTETIZADOS NAS LIGAS Ti-35Nb E Ti-35Nb-5Ta PARA IMPLANTES MÉDICOS

Clésio Cruz Melo, clesio@ufpi.edu.br¹

Moisés das Virgens Santana, moisesdvs@outlook.com²

¹Universidade Federal do Piauí

²Universidade Federal do Piauí

Resumo: A utilização do Titânio e suas ligas na fabricação de implantes médicos tem crescido devido suas propriedades e características tais como, elevada resistência mecânica, baixa densidade, elevada resistência à corrosão, baixo módulo de elasticidade e biocompatibilidade, motivado pela elevação da expectativa de vida. O conhecimento das características do oxido formado na superfície, porosidade, tipo de fase presente na camada oxidada, energia superficial, hidrofiliabilidade, são desejados para um revestimento bioativo e processo de osseointegração de implantes. Neste trabalho foi investigado a morfologia da camada nanoestrutura da sintetizadas por anodização, variando a tensão, na superfície das ligas Ti-35Nb e Ti-35Nb-5Ta obtidas por fusão em forno de arco voltaico de atmosfera controlada e processadas por tratamento termomecânico. Os nanotubos obtidos apresentaram morfologia, abertos no topo, fechado no fundo, diâmetro e comprimento maiores para as tensões de 20 e 25 V, alinhamento, espessura de parede, homogeneidade e distribuição bimodal desejados para aplicações biomédicas.

Palavras-chave: Ligas de titânio, nanotubos de TiO_2 , microestrutura, anodização, implantes

1 INTRODUÇÃO

A utilização das ligas de titânio nas indústrias médica e odontológica vem crescendo devido suas características, elevada resistência mecânica, baixa densidade, elevada resistência à corrosão, baixo módulo de elasticidade e biocompatibilidade, motivado principalmente pela elevação da expectativa de vida (NATIONS, 2019).

O titânio ao ser exposto ao oxigênio presente na atmosfera se oxida, formando uma camada de dióxido de titânio (TiO_2), que tem papel relevante no processo de osseointegração do implante (GRIMES; MOR, 2009; STEPANOVSKA et al., 2020). Nesse contexto torna-se vital o conhecimento das características da superfície, tais como, porosidade, tipo de fase presente, maior energia superficial, hidrofiliabilidade, que são desejados para formação de um revestimento bioativo para processo de osseointegração de implantes. Atualmente são utilizados diversos métodos para modificação das superfícies de Ti, sol-gel, pulverização a plasma, revestimento biomimético, deposição de vapor químico e oxidação anódica que se destaca pela simplicidade de realização, boa relação custo benefício e elevada taxa de sucesso clínico (ALIPAL et al., 2021).

Neste trabalho, será investigado a formação de camada oxidada superficial, nanoestruturada constituída por nanotubos (NTs) de TiO_2 , em amostras ligas das Ti-35Nb e Ti-35Nb-5Ta. Os resultados experimentais mostrarão que o modo de anodização, microestrutura do substrato, tipo de eletrólito, tempo de anodização e tensão aplicada são os principais parâmetros pelos quais a morfologia das estruturas nanotubulares pode ser ajustada com precisão.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Obtenção das Ligas

As ligas Ti-35Nb e Ti-35Nb-5Ta foram preparadas por fusão em forno elétrico a arco sob atmosfera de argônio utilizando-se elementos de alta pureza de Ti, Nb e Ta decapados quimicamente, mostrados na Tab.1 obtendo-se lingotes de 80 g.

Tabela 1. Ficha técnica dos metais utilizados para obtenção das ligas.

Metal	Grau de pureza (%)	Procedência	Decapagem química
Titânio	99,84%	Titânio – Brasil Ltda	90 ml HNO_3 , 30 ml HF
Nióbio	99,9%	CBMM	50 ml H_2SO_4 , 20 ml HNO_3 , 20 ml

			HF, 10 ml H ₂ O
Tântalo	99,9%	Alfa Aesar	50 ml H ₂ SO ₄ , 20 ml HNO ₃ , 20 ml HF

O processamento dos lingotes foi realizado a seguinte sequência:

- 1 - Encapsulamento dos lingotes em um tubo de vidro de quartzo preenchido com gás argônio;
- 2 - Homogeneização em forno de resistência a 1.000 °C por 12 h e resfriados no interior do forno (RF);
- 3 - Deformação plástica dos lingotes, em forja rotativa à temperatura de 1.000 °C obtendo-se barras cilíndricas com 12 mm de diâmetro, resfriados ao ar (RA) até atingir a temperatura ambiente;
- 4 - Secção das barras obtidas resultando em discos com espessura de ~1,5 mm;
- 5 - Tratamento térmico de solubilização das amostras em forma de disco à temperatura de 900 °C, com taxa de aquecimento de 30°C/minuto, por 1 hora em forno resistivo com controle de atmosfera de argônio, submetidos a têmpera em água (TA);
- 6 - Preparação metalográfica das amostras através do lixamento e posterior polimento com pasta de diamante de 0,6µm seguido de limpeza em banho de ultrassom em solução com água e detergente.

2.2 Caracterização Química e Microestrutural

As composições químicas foram aferidas por meio de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) e presença dos elementos intersticiais, oxigênio (O) e nitrogênio (N), foi avaliada em equipamento com células de infravermelho e condutividade exibidos na Tab. 2.

Tabela 2. Composição química nominal e analisada por FRX e teor de O e N.

Composição (%em massa)					
Liga	Ti	Nb	Ta	O	N
Ti-35Nb	balanço	33,317	-	0,155	0,0106
Ti-35Nb-5Ta	balanço	34,319	4,926	0,154	0,0109

A caracterização microestrutural foi realizada através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análise de difração de raios-X (DRX), utilizando-se radiação do Cu - K α e filtros de Ni, tensão de 40 kV e corrente de 30 mA, fendas divergentes de 1 e 1/2" e varredura com variação angular de 2 θ de 30° a 90°.

2.3 Caracterização Mecânica, Microdureza e Módulo de Elasticidade

Foram realizadas as medidas de microdureza Vickers e aferição do módulo de elasticidade por ultrassom conforme preconizado pela norma ASTM E-494 (2005).

2.4 Modificação Superficial das Ligas Pelo Processo de Anodização

A camada de óxido nanoestruturada foi sintetizada por meio do processo de anodização eletroquímica em aparato composto por fonte de tensão contínua, célula eletroquímica, solução eletrolítica de (HF 0,3%), amostra (anodo) e eletrodo de platina (catodo) utilizando-se os parâmetros exibidos na Tab. 3.

Tabela 3. Parâmetros do processo de anodização

Amostra	Tensão (V)	Distância (mm) catodo-anodo	Temperatura (°C)	Solução eletrolítica	Tempo (h)
Ti-35Nb	10	25	21-25	0,3% HF	1
	20				
	25				
Ti-35Nb-5Ta	10	25	21-25	0,3% HF	1
	20				
	25				

2.5 Caracterização Morfológica e Estrutural da Camada de TiO₂

A caracterização da morfologia da camada de óxido nanoestruturada foi realizada através da análise das imagens nas vistas superior e dos fragmentos desagregados, nas imagens capturadas por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura com canhão de emissão de campo (MEV). As medidas foram realizadas utilizando-se o software ImageJ®.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Microestrutura e Composição do Substrato

A composição química aferida exibida na Tab. 2 de ambas as ligas está muito próxima da composição nominal e os teores de intersticiais (N e O), abaixo do limite máximo permitido para a classificação de titânio grau I, estabelecido pela norma ASTM F67 (2006), 0,18% O e 0,02% N (% em massa).

As Figuras 1(a), (b), (c) e (d) apresentam as micrografias e resultados das análises de (DRX) das ligas Ti-35Nb e Ti-35Nb-5Ta respectivamente. Microestrutura bifásica na liga Ti-35Nb, com retenção parcial da fase β metaestável combinada com a fase martensítica e fração volumétrica da fase α'' muito maior na região das bordas em decorrência da elevada taxa de resfriamento e teor de Nb próximo a quantidade mínima necessária para estabilização completa da fase β , 36,7% a 42,5% Nb (SOUZA, 2008 apud DOBROMYSLOV; ELKIN, 2001); (BIGNON et al., 2021), além do valor de molibdênio equivalente $[Mo]_{eq} = 9,722$, inferior a 10, limite capaz de estabilizar a fase β (CHEN; CUI; ZHANG, 2020). A adição de 5% de Ta na liga Ti-35Nb, diminuiu a temperatura de início de formação da martensita (M_s) promovendo a retenção de quase 100% da fase β e maior valor do molibdênio equivalente para $[Mo]_{eq} = 10,722$.

Em ambas as ligas foi observado grãos grosseiros, medindo $680 \pm 178 \mu m$ para a liga Ti-35Nb e $264 \pm 81 \mu m$ para liga Ti-35Nb-5Ta. O inferior tamanho de grão observado para a liga Ti-35Nb-5Ta pode estar associado com a adição de Ta que atua impedindo seu crescimento (SOUZA et al., 2010).

Os difratogramas por raios-x (DRX) Fig. 1(b) identifica a presença e fração volumétrica das fases, martensítica ortorrômbica α'' e β na liga Ti-35Nb e Fig. 1(d) somente fase β na liga Ti-35Nb-5Ta. Tais resultados corroboram com a análise de microscopia. Há ainda a possibilidade da presença da fase ω em reduzida fração volumétrica e identificada no padrão de difração de DRX da liga Ti-35Nb em $2\theta = 79,5^\circ$, conforme previsto pela literatura (TANG; AHMED; RACK, 2000).

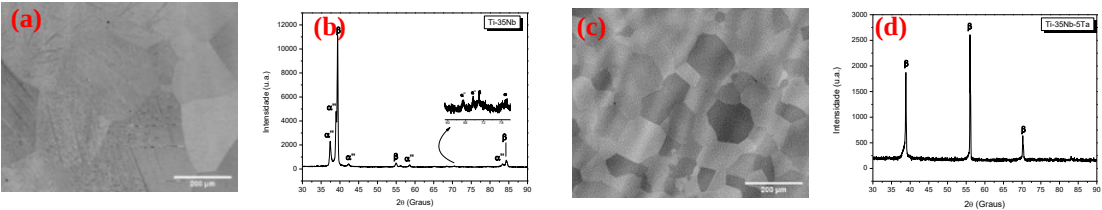


Figura 1. Microestruturas e difratograma de raios-X das ligada Ti-35Nb (a) e (b) e (c) e (d) da liga Ti-34Nb-5Ta respectivamente da liga na condição solubilizada e resfriada em água.

Os valores obtidos para microdureza e módulo de elasticidade, apresentados na Tab. 4, menor dureza e reduzido módulo de elasticidade para a liga Ti-35Nb-5Ta devido a retenção de 100% da fase β provocado pela adição de 5% Ta, embora para essa composição era esperado um maior efeito do endurecimento por solução sólida (ALEIXO, AFONSO, et al., 2008). O aumento dos teores de Nb e Ta aumenta a estabilização da fase β e reduz o módulo de elasticidade. (SOUZA et al., 2010b).

Tabela 4. Dureza Vickers e módulo de elasticidade das ligas Ti-35Nb e Ti-35Nb-5Ta.

Composição (% em massa)	Microdureza (HV)	Módulo de elasticidade (GPa)
Ti-35Nb	266 ± 15	88 ± 4
Ti-35Nb-5Ta	208 ± 2	68 ± 3

A dureza e módulo de elasticidade superiores da liga Ti-35Nb, ocorre devido a microestrutura bifásica ($\alpha'' + \beta$) e presença da fase ω em reduzida fração volumétrica. Embora o módulo de elasticidade fase α'' apresente menor valor quando comparado com fase β e a fase ω , mas a fase ω apresenta maior valor de módulo em ligas de Ti (ZHOU; NIINOMI; AKAHORI, 2004), além de promover aumento da dureza (HO; JU; CHERN LIN, 1999).

3.2 Análise Morfológica dos Nanotubos de TiO₂, sintetizados

A análise da morfologia dos nanotubos (NTs) sintetizados, com a aplicação das tensões 10, 20 e 25 V e influência da adição do Ta na liga Ti-35Nb foi realizada nas imagens obtidas por MEV, Figuras 2 (a), (b), (c), (d), (e) e (f) vistas superior da superfície e da secção transversal (g), (h), (i), (j), (k) e (l), os valores dimensionais são exibidos na Tab. 5.

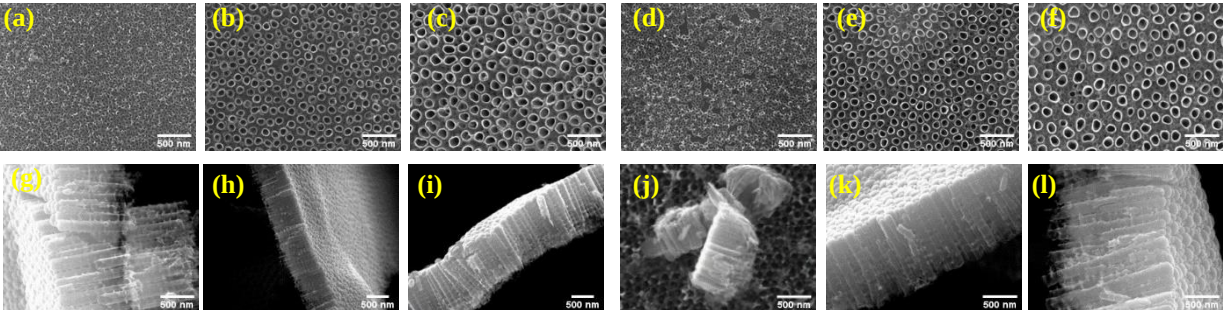


Figura 2. Imagens de MEV da superfície das amostras anodizadas todas utilizando eletrólito de HF 0,3% durante 1 hora com a tensão de 10 V (a), 20 V (b) e 25 V (c) vistas de topo, (g), (h) e (i) vistas da seção transversal da liga Ti-35Nb e 10V (d), 20V (e) e 25V (f) vistas de topo, (j), (k) e (l) vistas da seção transversal para a liga Ti-35Nb-5Ta.

Tabela 5. Parâmetros dimensionais dos NTS obtidos a partir da análise das imagens de MEV.

Composição	Tensão (V)	Diâmetro interno (nm)	Diâmetro externo (nm)	Comprimento de camada (nm)
Ti-35Nb	10	48 ± 6	31 ± 4	815 ± 34
	20	108 ± 10	85 ± 9	925 ± 17
	25	142 ± 18	123 ± 15	1153 ± 98
Ti-35-5Ta	10	51 ± 7	27 ± 6	220 ± 19
	20	108 ± 10	92 ± 9	856 ± 37
	25	129 ± 13	109 ± 13	1352 ± 46

Para a tensão de 10V foi observado na liga Ti-35Nb uma camada de óxido contínua, homogênea, nanotubos com diâmetro interno e comprimento de tamanhos reduzidos Fig. 2(a) e (g). Na liga Ti-35Nb-Ta é possível observar pequenas regiões com ausência de nanotubos, diâmetros similares ao da liga Ti-35Nb, porém com comprimento muito menor devido a tensão aplicada 10 V que produz um campo elétrico insuficiente para romper a resistência elétrica do camada de óxido formada no estágio inicial em eletrólito ácido contendo íons fluoreto. A presença de Ta na camada óxida pode ter elevado sua capacidade dielétrica e provocado a interrupção da continuidade do equilíbrio entre a taxa de formação da camada de óxido e dissolução da mesma, interrompendo a continuidade do aumento dos poros formados inicialmente e a densidade dos mesmos, extinguindo o processo de crescimento dos NTs (LOCKMAN et al., 2010).

Para tensão aplicada de 20 V a morfologia dos NTs na liga Ti-35Nb Fig. 2(b) e (h) apresentou homogeneidade, NTs com paredes rugosas, diâmetros, comprimentos de camada maiores e caracterização de distribuição bimodal. Similar morfologia foi verificada na liga Ti-35Nb-5Ta, Fig. 2(e) e (k), porém com comportamento bimodal diferente, maior regularidade aparente dos NTs, diâmetros semelhantes e comprimentos ligeiramente inferiores em relação aos NTs da liga Ti-35Nb, (BAUER; KLEBER; SCHMUKI, 2006).

O crescimento dos NTs sofre influência da quantidade de flúor presente no eletrólito e a magnitude do campo elétrico, ou seja a tensão aplicada pode modificar a relação entre a taxa de dissolução química na interface óxido/eletrólito e a taxa de crescimento da camada de óxido nanoestruturada na interface óxido/metal irá determinar o comprimento dos NTs (ZHU, 2015); (INDIRA et al., 2015). Com o aumento da voltagem de anodização até o limite de 20V, o campo elétrico aumenta e promove maior taxa de dissolução assistida por campo elétrico da camada de barreira formada no estágio inicial, que provoca maior taxa de aprofundamento dos poros formando nanotubos de diâmetros maiores e longos, (KHUDHAIR et al., 2017).

A morfologia da camada nanoestruturada para tensão de 25 V das ligas Ti-35Nb Fig. 2(c) e (i) e Ti-35Nb-5Ta Fig. 2(f) e (l) mostram uma camada homogênea, NTs com paredes nervuradas e comportamento bimodal semelhantes aos obtidos para tensão aplicada de 20 V, com pequeno aumento do diâmetro e aumento mais pronunciado do comprimento, conforme mostrado na Tab. 5.

A diferença da morfologia observada nas ligas estudadas, diâmetro, comprimento e comportamento bimodal para as tensões de 20 e 25V, também pode ter sofrido influência da microestrutura do substrato. Na liga bifásica ($\alpha'' + \beta$) a formação de óxidos metálicos (MO₂) devido a presença dos elementos metálicos (M) Ti, Ta e Nb, motivado pela diferença entre as taxas de dissolução da camada de óxido formados na fase α'' que apresenta maior instabilidade podendo ser dissolvida com maior facilidade quando está imersa em solução com presença de flúor, enquanto na fase β apresenta maior estabilidade que dificulta a dissolução (SAJI; CHOE; BRANTLEY, 2009).

O processo de formação de NTs se desenvolve em camadas de estrutura nanotubular sobre o substrato e sob a camada superior dos nanoporos podendo crescer em taxas diferentes, os tubos formados sob a influência de íons fluoreto (F⁻) crescem mais rapidamente e o crescimento dos nanotubos com menor velocidade de crescimento será interrompido (FERREIRA et al., 2013).

A leve desorganização da camada nanoestruturada da liga Ti-35Nb, possivelmente ocorreu devido a diferença das taxas dissolução nas fases α'' e β . A liga Ti-35Nb-5Ta monofásica (β) exibe morfologia altamente ordenada e comportamento bimodal mais homogêneo devido a maior estabilidade da fase β , devido a menor taxa de dissolução (KIM et al., 2013).

A presença de nervura nas paredes externas dos NTs de ambas as ligas para as voltagens de 20 e 25 V é explicado pela dissolução química da camada de óxido nanopora formada no estágio inicial e tempo de anodização de 1 h que permite a entrada de eletrólito contendo fluoreto nos espaços entre os NTs, que possibilita o contato com a superfície do substrato iniciando a formação de nova camada de óxido que se move para cima, devido o reduzido espaço entre os NTs a entrada de eletrólito é limitada, formando apenas nervuras ou anéis ao redor das bolhas de oxigênio que servem de moldes e estão presas na base do substrato, conforme previsto nas teorias do molde da bolha de oxigênio e “fluxo plástico” (ZHU, 2015).

A diferença do comportamento bimodal e dimensões dos NTs, da camada nanoestruturada, possivelmente foi influenciado pela macro e microestrutura da liga Ti-35Nb, que apresentou tamanho de grão médio superior ao obtido para a liga Ti-35Nb-5Ta e estrutura bifásica ($\alpha'' + \beta$). Por outro lado, a liga Ti-35Nb-5Ta apresentou NTs com

morfologia característica dos NTs formados sobre a fase β , embora possa ter sofrido influência do tamanho de grão reduzido e maior heterogeneidade. Essa diferença da morfologia, possivelmente ocorreu devido à realização da anodização em voltagem a partir de 20 V promovendo a redução do comprimento dos NTs devido a maior taxa de dissolução assistida por campo elétrico na interface óxido/eletrolito em relação a taxa de formação da camada de óxido na interface substrato/óxido, polarizando e enfraquecendo a ligação Ti-O não apenas na parte do fundo dos NTs mas ao longo de todo seu comprimento. O aumento do comprimento dos NTs na anodização realizada com a voltagem de 25 V e manutenção do grau de organização da camada nanoestruturada em relação a voltagem de 20 V, possivelmente ocorreu devido a intensidade do campo elétrico não ter sido suficiente para elevar a taxa de dissolução assistida por campo elétrico, como também pode estar associado a composição química e acidez do eletrólito, e aspectos relacionados ao substrato como tamanho de grão e microestrutura (FERREIRA et al., 2013).

4 CONCLUSÕES

Em suma, pode-se afirmar que o processo de anodização propiciou a presença de uma camada homogênea formada por nanotubos com elevada organização para as duas ligas obtidas para os maiores valores de tensões aplicadas, 20 e 25 V. Em todas as situações, os NTs são abertos no topo e fechados no fundo, com paredes de baixa espessura bem definidas, nervuradas, alinhadas e comportamento bimodal

5 REFERÊNCIAS

- ALIPAL, J. et al. **Evolution of anodised titanium for implant applications** Heliyon Elsevier Ltd, , 1 jul. 2021.
- CHEN, L. Y.; CUI, Y. W.; ZHANG, L. C. Recent development in beta titanium alloys for biomedical applications. **Metals**, v. 10, n. 9, p. 1–29, 1 set. 2020.
- FERREIRA, C. P. et al. Effects of substrate microstructure on the formation of oriented oxide nanotube arrays on Ti and Ti alloys. **Applied Surface Science**, v. 285, n. PARTB, p. 226–234, 15 nov. 2013.
- GRIMES, C. A.; MOR, G. K. **TiO₂ nanotube arrays: Synthesis, properties, and applications**. [s.l.] Springer US, 2009.
- HO, W.; JU, C.; CHERN LIN, J. **Structure and properties of cast binary Ti}Mo alloys**. [s.l.: s.n.].
- INDIRA, K. et al. A Review on TiO₂ Nanotubes: Influence of Anodization Parameters, Formation Mechanism, Properties, Corrosion Behavior, and Biomedical Applications. **Journal of Bio- and Tribo-Corrosion**, v. 1, n. 4, p. 1–22, 2015.
- KHUDHAIR, D. et al. Enhancement of electro-chemical properties of TiO₂ nanotubes for biological interfacing. **Materials Science and Engineering C**, v. 77, p. 111–120, 1 ago. 2017.
- KIM, E.-S. et al. Formation of titanium dioxide nanotubes on Ti-30Nb-xTa alloys by anodizing. 2013.
- LOCKMAN, Z. et al. Influence of anodisation voltage on the dimension of titania nanotubes. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 503, n. 2, p. 359–364, 6 ago. 2010.
- NATIONS, U. **Population Division of the UN Department of Economic and Social Affairs**. United Nations,. Anais...2019
- SAJI, V. S.; CHOE, H. C.; BRANTLEY, W. A. Nanotubular oxide layer formation on Ti-13Nb-13Zr alloy as a function of applied potential. **Journal of Materials Science**, v. 44, n. 15, p. 3975–3982, 21 ago. 2009.
- SOUZA, S. A. et al. Effect of the addition of Ta on microstructure and properties of Ti–Nb alloys. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 504, n. 2, p. 330–340, 20 ago. 2010a.
- SOUZA, S. A. et al. Effect of the addition of Ta on microstructure and properties of Ti–Nb alloys. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 504, n. 2, p. 330–340, 20 ago. 2010b.
- TANG, X.; AHMED, T.; RACK, H. J. Phase transformations in Ti-Nb-Ta and Ti-Nb-Ta-Zr alloys. **Journal of Materials Science**, v. 35, p. 1805–1811, 2000.
- ZHOU, Y. L.; NIINOMI, M.; AKAHORI, T. Decomposition of martensite α'' during aging treatments and resulting mechanical properties of Ti-Ta alloys. **Materials Science and Engineering A**, v. 384, n. 1–2, p. 92–101, 2004.
- ZHU, B. C. D.-L. Y. G. H. F. C. Y. W. M. S. Z. X.-F. Formation Mechanism of Gaps and Ribs Around Anodic TiO₂ Nanotubes and Method to Avoid Formation of Ribs. **The Electrochemical Society**, v. 162, p. 244–250, 2015.

RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores Clésio Cruz Melo e Moisés das Virgens Santana são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ESTUDO COMPARATIVO DE BARREIRAS ACÚSTICAS PARA MITIGAÇÃO DO RUÍDO URBANO

Delque Victo Silva de Sousa, delquedvs@ufpi.edu.br¹

Iane Aires Nolêto, ianeaires@ufpi.edu.br¹

Simone dos Santos, simone.santos@ufpi.edu.br¹

¹Universidade Federal do Piauí

Resumo: A poluição sonora é um crescente problema da nossa sociedade, especialmente quando se trata do ruído gerado pelas rodovias. Com o contínuo desenvolvimento das indústrias, infraestruturas de transporte e expansão das áreas urbanas, surge uma preocupação cada vez maior com a qualidade de vida dos seres humanos e a utilização adequada do espaço próximo a essas fontes de ruído. Uma das soluções passivas amplamente utilizadas para controlar ou reduzir o impacto sonoro é o uso de barreiras acústicas. Essas barreiras atuam na atenuação do ruído, protegendo os receptores e modificando o caminho de propagação do som. No presente estudo, investigou-se o comportamento acústico de diferentes tipos de barreiras acústicas, considerando também o contexto das rodovias. Para isso, a eficiência da atenuação do ruído das barreiras foi verificada por meio da comparação dos Níveis de Pressão Sonora (NPS) totais na zona de sombra para três geometrias distintas: uma barreira reta, uma barreira em formato de T e uma barreira em formato de Y. Utilizando equações governantes derivadas da equação de Helmholtz, que descrevem o problema acústico, aplicou-se o Método dos Elementos Finitos (MEF) com o auxílio do software comercial COMSOL Multiphysics®. Os resultados obtidos demonstraram que a geometria da barreira em formato de T apresentou a maior eficiência na redução do ruído, tanto em áreas urbanas quanto nas proximidades das rodovias. Essas descobertas são de extrema relevância para o planejamento urbano e para a adoção de medidas de controle de ruído em regiões afetadas pela poluição sonora, especialmente em rodovias movimentadas. Investir em soluções que envolvam o uso de barreiras acústicas eficientes e adequadas às especificidades das rodovias pode contribuir significativamente para mitigar os efeitos negativos do ruído nas comunidades próximas, melhorando assim a qualidade de vida das pessoas afetadas por esse problema.

Palavras-chave: Barreiras Acústicas, Método dos Elementos Finitos, Equação de Helmholtz, Níveis de Pressão Sonora.

1 INTRODUÇÃO

A urbanização no país experimentou um aumento significativo a partir da década de 40. De acordo com Soares (2006), nessa época, a maioria da população ainda vivia em áreas rurais. No entanto, o censo realizado pelo IBGE nos anos 70 revelou uma mudança, com a população brasileira tornando-se predominantemente urbana. Desde então, as taxas de urbanização não recuaram e atingiram impressionantes 81% em 2000, de acordo com os resultados do censo do IBGE.

Esse processo de urbanização trouxe consigo diversos desafios, incluindo o aumento do ruído nas áreas urbanas. A poluição sonora não é apenas um incômodo ambiental, mas também uma ameaça à saúde pública, como destacado por Basner *et al.* (2014). Entre os diferentes fatores que contribuem para o ruído urbano estão as construções civis, o tráfego de veículos, as indústrias, os alarmes, as sirenes, entre outros. Um dos efeitos mais negativos é o ruído gerado pelo tráfego nas estradas. Por essa razão, pesquisadores têm se dedicado a encontrar maneiras de mitigar a propagação desse ruído, e uma das soluções comuns são as barreiras acústicas.

L'Espérance *et al.* (1989), Muradali e Fyfe (1998), Rosenhouse (2019), e outros estudaram as barreiras acústicas usando a teoria da difração óptica acústica e o número de Fresnel. Esse número leva em consideração a diferença no percurso das ondas sonoras na presença e ausência de uma barreira acústica. Segundo Kulkina e Komkin (2020), a eficiência das barreiras acústicas é calculada usando a fórmula de Maekawa, que se baseia em dados experimentais. Bugaru *et al.* (2021) adotaram diferentes abordagens para analisar o problema das barreiras acústicas, incluindo a formulação de Maekawa-Tatge, o algoritmo de Kurze e Anderson, o método de previsão geral (GPM-ISO 9613) e a formulação de Menounou. Ao analisar os dados de simulações numéricas, os pesquisadores concluíram que o método mais eficaz para prever a atenuação do ruído em uma barreira acústica semi-infinita, rígida e fina é o GPM-ISO 9613.

Em outro estudo, Papadakis e Stavroulakis (2020) compararam os cálculos de perda de inserção de barreiras de ruído usando o Método dos Elementos Finitos (MEF) e várias fórmulas, como Kurze-Anderson, ISO 9613-2/Tatge e Menounou. Os resultados sugerem que o MEF pode ser aplicado de maneira eficaz para estimar com precisão a perda de inserção de barreiras de ruído, especialmente em casos em que as fórmulas convencionais mostram grandes desvios da solução

analítica. Estudos recentes, como os de Ghaffarivardavagh *et al.* (2019), M Sun *et al.* (2020) e Dong *et al.* (2021), exploraram o desenvolvimento de silenciadores de metamateriais ultra-abertos (UOM), que se baseiam na interferência do tipo Fano, matrizes de ressonadores em cascata (Jiménez *et al.*, 2017) e placas microperfuradas em camadas (Kim *et al.*, 2018; Tayong *et al.*, 2013). No entanto, de acordo com Crivoi e Fan (2022), a maioria desses estudos concentra-se em encontrar uma estrutura única com propriedades extraordinárias de atenuação sonora, sem levar em consideração a possível existência de limites teóricos rígidos para o desempenho ideal de certas classes de estruturas.

Em um artigo específico, Kim e Yoon (2015) analisaram o Nível da Pressão Sonora (NPS) em um domínio sem barreira e em um domínio com uma barreira reta. Eles observaram uma redução de 2 dB a 3 dB no NPS na região de sombra do domínio com a barreira. Além disso, diferentes geometrias de barreiras foram analisadas, resultando em diferentes valores de NPS na zona sombreada. Os melhores resultados foram obtidos com barreiras nos formatos *T* e *Y*.

Este estudo tem como objetivo investigar a eficiência de barreiras acústicas com diferentes formatos. Para isso, foi adotado um modelo que considera um domínio semi-infinito e utiliza a condição de contorno da Camada Perfeitamente Combinada (CPC), conforme ilustrado na Fig. 1. A equação de Helmholtz, que governa o problema acústico, foi resolvida utilizando o método dos elementos finitos. Em seguida, os valores do Nível de Pressão Sonora (NPS) obtidos foram analisados e comparados com os resultados encontrados na literatura.

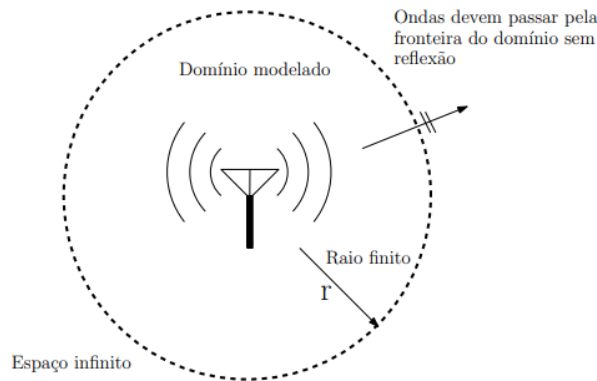


Figura 1. Condição da Camada Perfeitamente Combinada (adaptada de Oliveira, 2016).

2 METODOLOGIA

A equação de Helmholtz é uma descrição matemática do problema acústico, derivada dos princípios de conservação da massa e da equação do movimento. O princípio de conservação da massa, como afirmado por Oliveira (2016), é um dos fundamentos subjacentes dessa equação.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla v = 0. \quad (1)$$

Ao considerar a densidade do meio (ρ), o tempo (t), a velocidade (v) e (∇) o laplaciano, é possível utilizar a equação de movimento para substituir os termos na equação de conservação de massa. Dessa forma, elimina-se a dependência dessas equações em relação à velocidade, resultando em uma equação homogênea da onda acústica.

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0, \quad (2)$$

onde (p) é pressão (c) é a velocidade do som no meio, porém esta equação ainda possui dependência do tempo. Assumindo-se uma resposta oscilatória, da seguinte forma $P = p \cdot e^{-i\omega t}$, onde $i = \sqrt{-1}$, (ω) a variável conjugada do tempo (t) e (P) é a amplitude da pressão, que independe do tempo, logo, a equação de Helmholtz, fica na forma:

$$\nabla^2 P + k^2 P = 0, \quad (3)$$

sendo (k) o número de onda. O nível de pressão sonora é uma medida que indica a intensidade de uma onda sonora e é determinado pela amplitude da onda. Existem duas razões para essa determinação: a sensibilidade do ouvido às variações de pressão e a facilidade de medição. A unidade de medida internacional para o nível de pressão sonora é o decibel (dB), conforme definido por Oliveira (2016).

3 RESULTADOS

3.1 Exemplo Numérico

Nesta seção, foi considerado um domínio acústico Ω , que é representado por um semicírculo de raio 12 metros. Os eixos coordenados x e y correspondem ao comprimento e à altura, respectivamente, conforme ilustrado na Fig. 2. A fonte sonora está localizada no ponto $P(0,0)$ e possui um valor inicial de pressão complexa de $P = 1 + i$. Além disso, a fonte apresenta uma taxa de fluxo de volume de $Q_s = 0,02 \text{ m}^3/\text{s}$ e uma frequência de $f = 100 \text{ Hz}$. Considerando que o domínio seja preenchido com ar, os parâmetros de densidade (ρ) e módulo de bulk (K) são determinados como $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ e $K = \rho c^2$, respectivamente. É importante mencionar que um modelo semelhante foi previamente apresentado por (Kim e Yoon, 2015).

A barreira acústica foi posicionada a uma distância de 4 metros do ponto P , com dimensões de $1 \text{ m} \times 0,025 \text{ m}$. Foi realizada uma análise da resposta acústica em dois pontos específicos: $R_1(8, 0)$ e $R_2(8, 1)$. Para realizar a simulação, foi utilizado o software COMSOL Multiphysics®, no qual a geometria do problema foi implementada utilizando a opção física controlada disponível no software. Para a discretização do domínio acústico, foi adotada uma malha triangular livre enquanto uma malha quadrilateral foi aplicada na região de fronteira para representar a condição de contorno do problema: a Camada Perfeitamente Combinada (CPC), utilizada para simular o meio infinito. A seguir, serão apresentados os resultados do Nível de Pressão Sonora (NPS), considerando três tipos de barreiras: reta, T e Y .

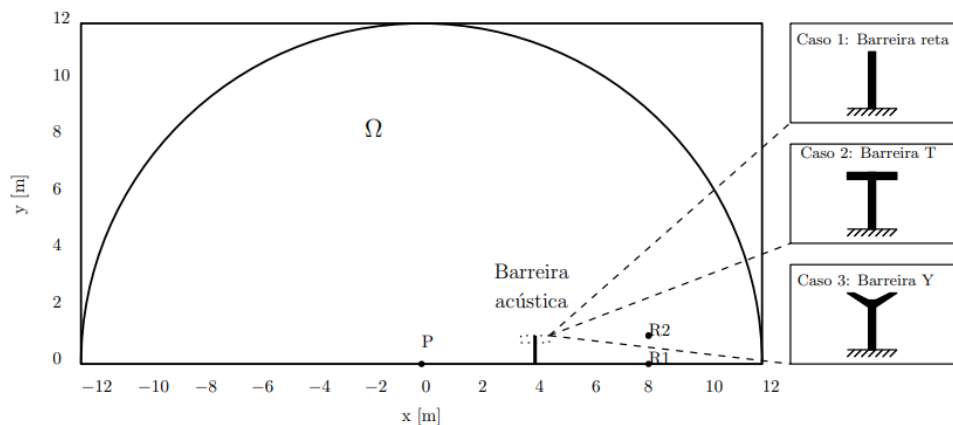


Figura 2. Domínio do problema

3.2 Barreira Reta

Os resultados da pressão sonora total são apresentados nos gráficos da Fig. 3. Na Fig. 3.a, temos o domínio da pressão sonora total sem a presença da barreira, enquanto na Fig. 3.b, a barreira reta é considerada. É evidente que a presença da barreira reta altera o caminho de propagação da pressão sonora emitida pela fonte, resultando em diferenças de pressão em diferentes regiões do domínio, observa-se a redução do NPS total no ponto R_1 de 94,95 dB para 92,80 dB, com redução percentual de 2,26% e em R_2 de 95,05 dB para 91,60 dB com redução percentual de 3,63%. Além disso, ao observar a escala de cores, fica claro que a magnitude da pressão sonora é reduzida com a presença da barreira.

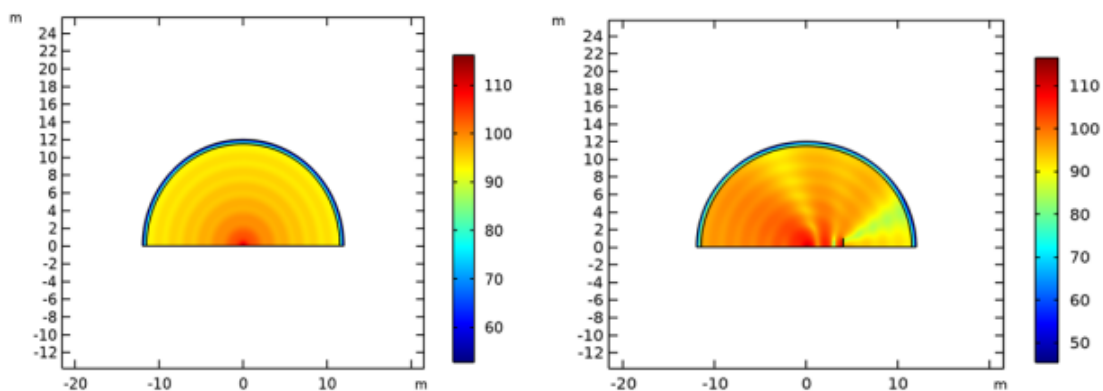


Figura 3. NPS total: (a) sem barreira; (b) com barreira reta

3.3 Barreira em Formato Y

Considerando um subdomínio com uma barreira em formato Y , observamos no gráfico da Fig. 4 que os valores de Nível de Pressão Sonora (NPS) nos pontos receptores apresentaram uma redução. No ponto R_1 , houve uma diminuição

de 94,95 dB para 90,80 dB, com redução percentual de 4,37%, enquanto no ponto R_2 , ocorreu uma redução de 95,05 dB para 89,30 dB, com redução percentual de 6,06%.

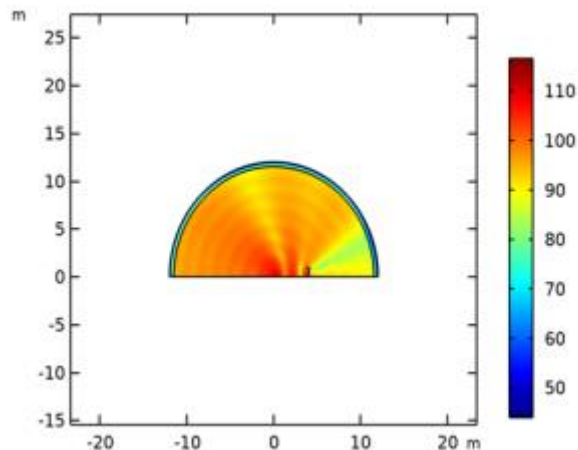


Figura 4. NPS total para um domínio acústico com barreira Y

3.4 Barreira em Formato T

No caso da barreira em formato T , conforme ilustrado no gráfico da Fig. 5, foram obtidos os valores do Nível de Pressão Sonora (NPS) total nos pontos R_1 e R_2 . Em R_1 , o NPS total é de 90,20 dB, representando uma atenuação de 4,75 dB em comparação com o domínio de projeto sem barreira, uma redução percentual de 5%. Já em R_2 , o valor do NPS total é de 88,5 dB, com uma redução de 6,55 dB, uma redução percentual de 6,9%. Esses resultados indicam a eficiência da barreira em formato T na redução da pressão sonora nos pontos receptores.

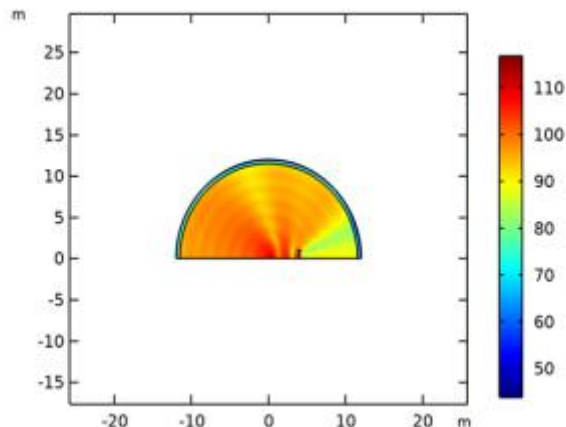


Figura 5. NPS total para um domínio acústico com barreira T

4 CONCLUSÃO

Este estudo analisou o comportamento de barreiras acústicas por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF). Foram obtidos níveis de pressão sonora em dois pontos receptores localizados nas zonas de sombra das barreiras. Três geometrias de barreiras foram consideradas: reta, Y e T, com altura de 1 m. Como esperado, a barreira em forma de T apresentou o melhor desempenho na atenuação de ruído em comparação com as outras geometrias estudadas. De acordo com Kim e Yoon (2015), a maioria das pesquisas que comparam diferentes formatos de barreiras concluem que a barreira em forma de T é a mais eficaz, o que está em consonância com os resultados deste estudo. Além disso, observou-se que o NPS total é menor no ponto receptor 2 em comparação com o ponto receptor 1, ao comparar os diferentes formatos em cada ponto receptor escolhido. A barreira em T reduziu o NPS total em 4,75 dB no ponto receptor 1 e 6,55 dB no ponto receptor 2, reduções maiores em comparação com as demais geometrias, o que evidencia a maior eficiência da barreira em formato de T.

5 REFERÊNCIAS

Basner, M., Babisch, W., Davis, A., Brink, M., Clark, C., Janssen, S. and Stansfeld, S., 2014. "Auditory and non-auditory effects of noise on health". *The lancet*, Vol. 383, No. 9925, pp. 1325–1332.

- Bugaru, M., Vasile, O. and Neagoe, M., 2021. “Recent developments of noise attenuation using acoustic barriers for a specific edge geometry”. *Computation*, Vol. 9, No. 12, p. 129.
- Crivoi, A. and Fan, Z., 2022. “Noise attenuating performance of metasurfaces with regular euclidean tiling and uniformly embedded helmholtz resonators”. *Applied Acoustics*, Vol. 185, p. 108388.
- Dong, R., Mao, D., Wang, X. and Li, Y., 2021. “Ultrabroadband acoustic ventilation barriers via hybrid-functional metasurfaces”. *Physical Review Applied*, Vol. 15, No. 2, p. 024044.
- Ghaffarivardavagh, R., Nikolajczyk, J., Anderson, S. and Zhang, X., 2019. “Ultra-open acoustic metamaterial silencer based on fano-like interference”. *Physical Review B*, Vol. 99, No. 2, p. 024302.
- Jiménez, N., Romero-García, V., Pagneux, V. and Groby, J.P., 2017. “Rainbow-trapping absorbers: Broadband, perfect and asymmetric sound absorption by subwavelength panels for transmission problems”. *Scientific reports*, Vol. 7, No. 1, pp. 1–12.
- Kim, H.S., Ma, P.S., Kim, S.R., Lee, S.H. and Seo, Y.H., 2018. “A model for the sound absorption coefficient of multilayered elastic micro-perforated plates”. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 430, pp. 75–92.
- Kim, K.H. and Yoon, G.H., 2015. “Optimal rigid and porous material distributions for noise barrier by acoustic topology optimization”. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 339, pp. 123–142.
- Kulkina, V. and Komkin, A., 2020. “Study of acoustic characteristics of noise barriers”. *MATEC Web of Conferences*, Vol. 320, p. 00030.
- L’Espérance, A., Nicolas, J. and Daigle, G., 1989. “Insertion loss of absorbent barriers on ground”. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 86, No. 3, pp. 1060–1064.
- M Sun, X.F., Mao, D., Wang, X. and Li, Y., 2020. “Broadband acoustic ventilation barriers”. *Physical Review Applied*, Vol. 13, No. 4, p. 044028.
- Muradali, A. and Fyfe, K., 1998. “A study of 2d and 3d barrier insertion loss using improved diffraction-based methods”. *Applied Acoustics*, Vol. 53, No. 1-3, pp. 49–75.
- Oliveira, J.R.L., 2016. “*Comparação da resposta acústica e fluido-estrutural de um pistão subaquático utilizando métodos analíticos e o método dos elementos finitos*”.
- Papadakis, N.M. and Stavroulakis, G.E., 2020. “Finite element method for the estimation of insertion loss of noise barriers: Comparison with various formulae (2d)”. *Urban Science*, Vol. 4, No. 4, p. 77.
- Rosenhouse, G., 2019. “The use of the simplex approach for analysis of semi-infinite and finite sound barriers”. Vol. 259, No. 7, pp. 2956–2966.
- Soares, P.R., 2006. “Cidades médias e aglomerações urbanas: a nova organização do espaço regional no Sul do Brasil”. *Cidades médias: produção do espaço urbano e regional*. São Paulo: Expressão Popular, Vol. 1, pp. 347–364.
- Tayong, R., Dupont, T. and Leclaire, P., 2013. “Sound absorption of a micro-perforated plate backed by a porous material under high sound excitation: Measurement and prediction”. *International Journal of Engineering & Technology*, Vol. 2, No. 4, p. 281.

6 RESPONSABILIDADE AUTORAL

O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo conteúdo deste trabalho.

ANÁLISE DE LIGAS DE ALUMÍNIO 6351 TERMICAMENTE TRATADAS E SUBMETIDAS A EXTRUSÃO EM CANAL ANGULAR

Alison Alex Veloso Alves¹, alison_alves21@hotmail.com¹
João Rodrigues de Barros Neto², joaorbneto@ufpi.edu.br²
Francisco Rafael Pereira da Costa³, franciscorafael@ifpi.edu.br³

¹Universidade Federal do Piauí (UFPI)

Resumo: O alumínio e suas ligas são uns dos metais mais utilizados nas indústrias aeronáutica, automotiva e naval devido principalmente à sua baixa densidade. No entanto, o alumínio puro apresenta baixa resistência mecânica e assim sendo necessário adicionar outros elementos para formar as ligas de alumínio e assim melhorar as propriedades sem aumento significativo na densidade. Com isso, atender as aplicações de engenharia. Uma das ligas mais usadas é a liga 6351 devido às possibilidades de aumento significativo nas propriedades através de conformação mecânica e/ou tratamentos térmicos. Neste trabalho a liga 6351 foi submetida ao processo de conformação denominado ECAP (equal-channel angular pressing ou extrusão em canal angular) e posteriormente tratamentos térmicos. Nesta pesquisa foi analisado o efeito do ECAP em amostras de liga 6351 submetidas a tratamentos térmicos de solubilização, recozimento pleno, e solubilização seguida por envelhecimento. O processo segue na introdução de cada amostra tratada na matriz que consiste em dois canais de seção transversal iguais que se cruzam em um ângulo de 110° , sendo extrudada com a ajuda de uma punção. A temperatura de processamento (150°C) e velocidade de prensagem (10mm/min) serão padronizadas, para comparação posterior e sendo adicionada a rota de processamento (Bc). As análises microestruturais serão avaliadas por microscopia óptica (MO) e difração de raios X (DRX), e as propriedades mecânicas por micro dureza Vickers. Verificou-se que as amostras submetidas ao processo de deformação plástica, ECAP, houve um refinamento no tamanho do grão e assim de acordo com a relação Hall-Petch promove o melhoramento de resistência mecânica. Os tratamentos térmicos promoveram a formação de uma dispersão densa e fina de partículas dentro da liga promovendo assim o aumento da resistência mecânica.

Palavras-chave: ligas de alumínio, extrusão em canal angular, propriedades mecânicas.

1 INTRODUÇÃO

A produção do alumínio e suas ligas é um dos mais utilizados na indústria metalúrgica e com crescente uso nas áreas aeronáutica, automotiva e naval, das suas características temos: baixa relação peso/resistência, boa conformabilidade e durabilidade, condutividade elétrica e térmica excelentes, e boa resistência à corrosão. Por conta de suas excelentes características, o alumínio tem ocupado lugar de destaque nas aplicações de engenharia no Brasil e no mundo, se tornando assim o metal não ferroso mais produzido na indústria metalmeccânica conforme apresentado (Gonçalves e Silva, 2015; e Perez, 2016).

Por conta de o alumínio puro apresentar pouca resistência mecânica, outros elementos de liga (como o manganês, cobre, lítio, magnésio, zinco e silício) são acrescentados para a formação de ligas e atender aos requisitos necessários para aplicações de engenharia. As ligas de alumínio da série 6XXX apresentam magnésio (Mg) e silício (Si) como elementos de liga predominantes, contendo a proporção necessária para a formação do silicato de magnésio (Mg_2Si), tornando essa liga termicamente tratável, visto em (Gonçalves e Silva, 2015; Perez, 2016; e Silva 2014).

Nas ligas em que suas propriedades podem ser melhoradas por meio de tratamentos térmicos, para promover o aumento da resistência mecânica, também podem ser combinadas com métodos de deformação plástica, para aumento de suas propriedades mecânicas. Uma das várias técnicas de deformação plástica severa, relatado em Thiagarajan e Gopinath (2014), é a Extrusão em Canais Iguais Angular ou equal-channel angular pressing (ECAP), pois além de ser um método de baixo custo também visa maximizar o refinamento da microestrutura e a densidade dos defeitos da rede cristalina do material, resultando assim em um aumento considerável de resistência mecânica do metal processado.

Considerando a necessidade de mais estudos referentes ao melhoramento mecânico e econômico de ligas de alumínio, com relação à deformação plástica e tratamentos térmicos, este trabalho propõe a análise da microestrutura e propriedade mecânica em uma liga de alumínio (6351) submetida a Extrusão em Canais Iguais Angular (ECAP) e tratamentos de recozimento pleno, solubilização e envelhecimento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com Jinan (2018), em termos de processamento, as ligas de alumínio podem ser divididas em dois grandes grupos. Ligas para usinagem e ligas para fundição. As ligas de alumínio processadas (laminadas, extrudadas, forjadas, etc.) são classificadas de acordo com os principais elementos de liga encontrados. As ligas tratáveis termicamente, ou seja, ligas cujas propriedades podem ser aprimoradas pela utilização de tratamentos térmicos com ou sem deformação plástica, são as séries 2XXX, 6XXX e 7XXX. As ligas não tratáveis termicamente só podem ser tratadas por encruamento, tais séries são as de 1XXX, 3XXX, 4XXX e 5XXX.

Nas ligas da série 6XXX, o composto intermetálico Mg_2Si , responsável pelo endurecimento da liga, é formado pela combinação de magnésio e silício. A solubilidade da fase Mg_2Si na matriz de alumínio aumenta com o aumento da temperatura. Através do tratamento de solubilização e envelhecimento artificial, uma segunda fase pode ser precipitada a partir de uma solução sólida supersaturada, resultando em precipitados finos uniformemente distribuídos e aumentando a dureza do material conforme anunciado em Huaraca (2021).

Al 6351 é conhecido por seu peso leve ($\gamma = 2,7g/cm^3$) e alta resistência ao ataque por ar, água, óleo e muitos produtos químicos. Suas composições químicas são Si (0,93), Fe (0,36), Cu (0,1), Mn (0,57), Mg (0,55), Zn (0,134), Ti (0,014) e Al restante. Sua condutividade elétrica e térmica é quatro vezes maior que o aço e sua resistência é maior que outras ligas da série 6XXX, conhecida como liga estrutural, esta liga é amplamente utilizada para aplicações de chapas e usinagem. A liga 6351 tornou-se uma nova alternativa à liga 6061 (usada para estruturas, construção naval e veículos) em muitas aplicações devido à sua resistência. Esta liga contém uma quantidade maior de silício do que o magnésio e outros elementos e ocorre na forma da fase γ da série Mg_2Si . O alumínio 6351 é usado nas indústrias, pois oferece resistência, tenacidade, usinabilidade e soldabilidade suficientes. Ainda é usado para construir navios, postes, chaminés, canos, tubos, carros e pontes, como descrito em El-Rahman (2015).

2.1 Tratamentos Térmicos

O objetivo das ligas tratadas termicamente é criar uma dispersão densa e fina de grãos dentro da liga, no qual evita que os deslocamentos se movam durante a deformação, pois eles devem contornar os grãos precipitados. Ao limitar o movimento das discordâncias durante o processo de deformação, a liga é fortalecida pela presença de precipitados o ajudando a melhorar a resistência mecânica (Huaraca, 2021d).

De acordo com Silva (2014c), no recozimento o alumínio é aquecido a 300°-450°C, e recristalizando quase instantaneamente, e o processo de resfriamento ocorre então a uma taxa de 30°C por hora até uma temperatura de 250°C, depois disso, a peça é resfriada a temperatura ambiente (ou dentro do forno) para reduzir o encruamento do processo de conformação e outros processos de usinagem e desfazer os resultados dos tratamentos anteriores. Conforme Rodrigues (2015), durante o processo de solubilização, o alumínio é aquecido a temperaturas próximas de 500°C, produzindo uma solução rica em soluto, o objetivo desta medida é atingir a maior concentração possível de elementos endurecedores como cobre, zinco, magnésio e/ou silício na solução sólida. Por fim Assaad (2016) relata que o envelhecimento é um processo pelo qual as ligas são aquecidas entre 150 – 200°C, durante 30 min a 5 h, permitindo que uma série de transformações ocorram resultando na formação de precipitados, esses precipitados causam tensão na rede cristalina resultando em um aumento na dureza da liga.

2.2 ECAP

De acordo com (Oliveira, 2004) e (Valiev e Langdon, 2006) a Extrusão em Canais Iguais Angular ou Equal-Channel Angular Pressing (ECAP), é um método de deformação plástica severa que tem como objetivo o refino de grão através de uma deformação por cisalhamento simples. O método ECAP pode ser executado em um tarugo ou barra retangular no qual é usinada para caber dentro do canal e a matriz é colocada em alguma forma de prensa para que a amostra possa ser pressionada através da matriz usando um êmbolo. A matriz ECAP contém dois canais sequenciais que se interceptam fazendo entre si um ângulo Φ como mostrado na Fig. 1. A forma de deformação imposta desse método é através da passagem do material entre esses canais presentes dentro da matriz.

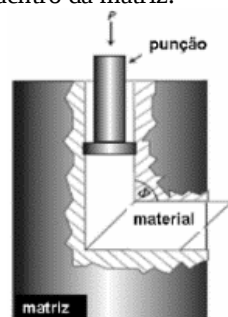


Figura 1. Desenho esquemático do processo ECAP (Oliveira, 2004e).

já se encontra consolidado na literatura (Costa, 2022; Gupta *et al.*, 2021 e Oliveira, 2004e) que existem quatro rotas de passagem no método ECAP, e cada uma tem diferentes ângulos de rotação da amostra, com o objetivo de atingir o nível de deformação desejado, classificadas como rotas A, B_A, B_C e C. A seleção de uma rota em específico deve ser seguida estritamente, pois cada rota de passagem tem efeitos diferentes na microestrutura do corpo de prova. A rota A é a rota simples, onde não há mudança no ângulo de rotação. Já na rota B_A, o ângulo de rotação é alterado em 90° entre cada prensagem. Na rota B_C, o corpo de prova é girado 90° a cada passe na mesma direção (sentido horário ou anti-horário). Enquanto que na rota C, o tarugo gira sempre 180° para cada prensagem.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Será mostrado a seguir um fluxograma apresentado na Fig. 2, com relação aos materiais e métodos usados no processamento da liga de alumínio 6351, bem como suas caracterizações correspondentes as propriedades buscadas neste trabalho.

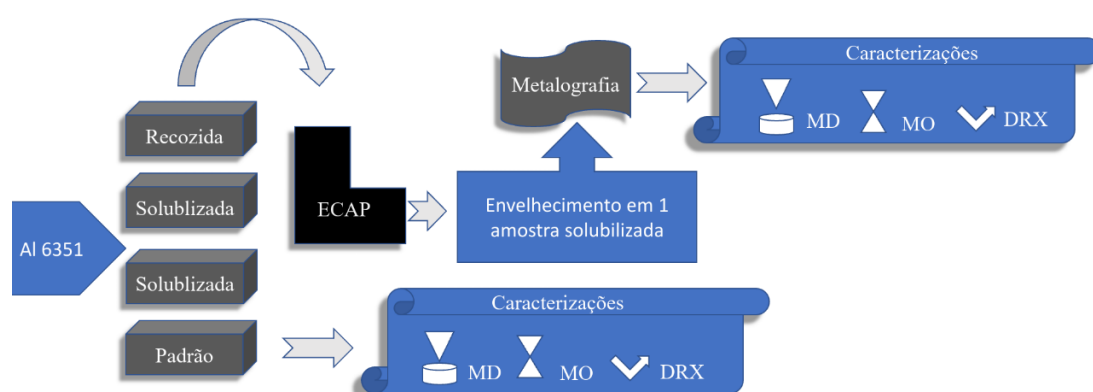


Figura 2. Estrutura da metodologia utilizada na realização deste trabalho, (MD) micro dureza Vickers, (MO) microscopia ótica, (DRX) difração de raios-X.

A liga de alumínio 6351 foi doada na forma de uma barra retangular com 30 cm de comprimento e 15 mm de espessura. Após a confecção dos corpos de prova, com o auxílio de uma máquina cortadora metalográfica cut-off e uma lixadeira para ajuste das dimensões, foram obtidas 4 amostras com dimensões de 11 x 11 x 55 mm, como também houve o recolhimento de amostras menores para comparação das caracterizações de microscopia cóptica, difração de raios-X e micro dureza Vickers, feitas antes e após os métodos propostos neste trabalho.

3.1 Tratamentos térmicos

As ligas 6351 foram submetidas a tratamentos térmicos de solubilização, recozimento pleno, e solubilização seguida por envelhecimento (pós processamento ECAP), as temperaturas do recozimento pleno foram de 350 °C durante 1 hora com resfriamento no interior do forno até a temperatura ambiente, a solubilização ocorreu a 530 °C durante 30 min com resfriamento em água a temperatura ambiente, e por fim o envelhecimento feito na amostra solubilizada após ser submetida ao ECAP, sob temperatura de 180 °C durante 30 min.

3.2 ECAE

O equipamento ECAP apresentava uma matriz bipartida e uma punção, todos de aço H13, e seus dois canais angulares ($\Phi = 110^\circ$ e $\psi = 80^\circ$) são capazes de atingir uma deformação de 0.8 por passe, como pode ser visto na figura 8. O atrito do corpo de prova com o canal da matriz foi reduzido usando como lubrificante o MoS₂ da marca GN Plus – Molykote.

Quatro resistências elétricas do tipo cartucho foram necessárias para manter a matriz aquecida, no qual foram inseridas em locais próximos ao canal de extrusão. Um controlador Fly ever FE50RPN, e um termopar tipo k, foram usados em conjunto para obtenção do controle de temperatura das resistências, no qual eram mantidos dentro do canal da matriz por 10 minutos antecedendo cada passe do corpo de prova durante o processo. A temperatura de processamento (150°C) e velocidade de prensagem (10mm/min) serão padronizadas de acordo com Costa (2022f), para comparação posterior e sendo adicionada a rota de processamento (Bc) nesta pesquisa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Devido à alta intensidade do pico da matriz, houve uma inibição na visualização de outros picos menos intensos, mas ainda proeminentes. Portanto, na Fig. 3, a região de baixa intensidade foi ampliada e apenas os picos de baixa intensidade

foram analisados para identificar alguns precipitados. Entre os precipitados está o composto intermetálico Mg_2Si responsável pelo endurecimento por precipitação da liga 6351. Os principais elementos de liga encontrados foram Si, Mg, Mn e Fe, conforme indicado pela composição química. Portanto, a presença de precipitados contendo esses elementos era esperada. Dependendo da intensidade dos picos, as condições de entrega incluem principalmente depósitos de $FeSi_2$ e Al_2Mn_3 . O estado recozido permaneceu semelhante, indicando que não houve solubilização desses precipitados. Após o tratamento do material solubilizado, os picos correspondentes a $FeSi_2$, Al_2Mn_3 aumentaram de intensidade, demonstrando que o tratamento à temperatura de 150 °C favorece a formação desta segunda fase.

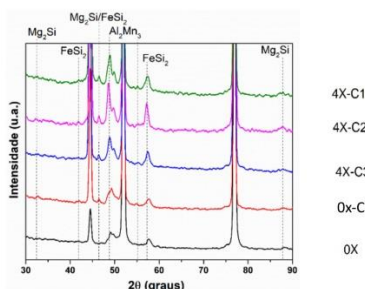


Figura 3. Precipitados identificados na liga 6351.

A Tabela 1 a seguir mostra os valores da microdureza para a liga 6351. Dos dados abaixo tem-se relativamente ao material como recebido (0X) que de 104,29 HV (feito antes do processamento ECAP) subiu para 143,1 HV após o processamento ECAP (4X), e o recozido (0X-C1) que de 38,1 HV subiu para 73,1 HV, já na amostra solubilizada (X-C2), de 55,0 HV subiu para 63,2 HV (4X-C2), e por fim, na amostra solubilizada e envelhecida (X-C3), de 45,8 HV subiu para 49,9 HV após o processamento (4X-C3).

Tabela 1. Microdureza Vickers da liga 6351, antes e após ECAP.

Amostra	Valor médio da Microdureza Vickers (HV)	Desvio Padrão
0X	104,29	0,07
4X	143,1	0,55
0X-C1	38,1	1,62
4X-C1	73,1	0,78
X-C2	55,0	3,95
4X-C2	63,2	1,73
X-C3	45,8	1,03
4X-C3	49,9	0,44

Na microscopia óptica das amostras não se conseguiu obter imagens destacando os contornos de grão, após tentativas sem sucesso de se obter os contornos de grão utilizando ataques convencionais como por exemplo soda caustica, variou-se o tempo e o modo do ataque em cada tentativa, porém sem sucesso. Na Figura 4 tem-se a MO obtida para a liga 6351 nas condições 4X, 4X-C1, 4X-C2 e 4X-C3 após o ataque químico,

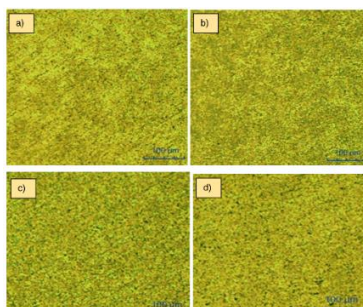


Figura 4. - MO da liga 6351, após ataque (100X): a) 4X, b)4X-C1, c)4X-C2; d)4X-C3.

5 CONCLUSÃO

Concluiu-se que as amostras submetidas ao processo ECAP e tratadas termicamente, houve um aumento na dureza sugerindo um aumento na resistência mecânica. No entanto, necessita investigar o real motivo do aumento da resistência mecânica. Pois pelo difratograma houve um aumento da quantidade dos precipitados de $FeSi_2$ e Al_2Mn_3 , mas não houve uma visão clara do tamanho de grão.

6 REFERÊNCIAS

- Assaad, A., 2016. *Quench Sensitivity of 6xxx Aluminum Alloys*. Tese - Pós-Graduação em Ciências Aplicadas em Engenharia Mecânica, Waterloo, Ontario, Canadá, 83 p.
- Costa, F., 2022. *Estudo do Comportamento das Ligas de Alumínio 6351 t6 e 7075 t651 Submetidas ao Processo de Extrusão em Canal Angular*. Tese - Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí (IFPI), Teresina, 102 p.
- El-Rahman, A. Y., 2015. *Modification of Mechanical Properties of 6351 Al-Mg-Si Alloy by Aging Heat Treatment*. Tese - Pós-Graduação em Ciências Aplicadas em Engenharia Metalúrgica, Universidade do Cairo, Giza, 92 p.
- Gonçalves, R. A., Silva, M. B., 2015. *Influence of Copper Content on 6351 Aluminum Alloy Machinability*. Procedia Manufacturing, Diamantina, Minas Gerais, Vol. 1, pp. 683–695.
- Gupta, A.; Chandrasekhar, B.; Saxena, K. 2021. *Effect of Equal-channel Angular Pressing on Mechanical Properties: An overview*. Materials Today. Vol. 45, pp. 5602-5607.
- Huaraca, N. C., 2021. *Efeito do Tratamento Térmico T4 e T6 Sobre Microestrutura e Dureza da Liga de Alumínio da Série 6061*. Tese - Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Manaus, 71 p.
- Jinan, W. T., 2018. *Estudo da Evolução Microestrutural no Processo de Extrusão de Tubo da Liga AA6351*. Tese - Pós-Graduação em Ciências pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 55 p.
- Oliveira, L., F., 2004. *Aplicação de Extrusão Angular em Canal em Materiais Metálicos*. Tese - Pós-Graduação de Ciências em Engenharia Metalúrgica e de materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 93 p.
- Perez, J. C., 2016. *Avaliação do Processo da Deposição Superficial por Atrito em Ligas de Alumínio AA6351-T6 Sobre Substrato de Liga de Alumínio AA5052-H32*. Tese - Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), Paraná, 123 p.
- Rodrigues, G. L., 2015. *Effects of the Thermal Treatments in Aluminum Alloys*. Tese - Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Rio Verde (UniRV), Rio Verde, Goiás, 41 p.
- Silva, J.C., 2014. *Avaliação do Comportamento das Ligas de Alumínio 6005, 6063, 6351 Submetidas a Diferentes Tratamentos Térmicos*. Tese - Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia, 64 p.
- Thiyagarajan, R., Gopinath, A., 2014. *Enhancement of Mechanical Properties of AA 6351 Using Equal Channel Angular Extrusion (ECAE)*. Materials Science and Metallurgy Engineering, Vol. 2, pp. 26-30 p.
- Valiev, R. Langdon, T., 2006. *Principles of Equal-channel Angular Pressing as a Processing Tool for Grain Refinement*. Progress in Materials Science. vol. 51, pp. 881–981.

7 RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.