

ENGENHARIA MECÂNICA E SUAS APLICAÇÕES

Wênio Fhará Alencar Borges
Filipi Maciel de Melo
Igor Antonio de Oliveira Carvalho
(Organizadores)

EDITORA INOVAR

ENGENHARIA MECÂNICA E SUAS APLICAÇÕES

Wênio Fhará Alencar Borges
Filipi Maciel de Melo
Igor Antonio de Oliveira Carvalho
(Organizadores)

ENGENHARIA MECÂNICA E SUAS APLICAÇÕES

1.ª edição



Copyright © das autoras e dos autores.

Todos os direitos garantidos. Este é um livro publicado em acesso aberto, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais e que o trabalho original seja corretamente citado. Este trabalho está licenciado com uma Licença Creative Commons Internacional (CC BY-NC 4.0).



Wênio Fhará Alencar Borges; Filipi Maciel de Melo; Igor Antonio de Oliveira Carvalho (Organizadores).

Engenharia mecânica e suas aplicações. Campo Grande: Editora Inovar, 2021. 142p.

ISBN: 978-65-86212-70-9

DOI: 10.36926/editorainovar-978-65-86212-70-9

1. Engenharia. 2. Engenharia mecânica. 3. Pesquisas. 5. Autores. I. Título.

CDD – 620

As ideias veiculadas e opiniões emitidas nos capítulos, bem como a revisão dos mesmos, são de inteira responsabilidade de seus autores.

Conselho Científico da Editora Inovar:

Franchys Marizethe Nascimento Santana (UFMS/Brasil); Jucimara Silva Rojas (UFMS/Brasil); Maria Cristina Neves de Azevedo (UFOP/Brasil); Ordália Alves de Almeida (UFMS/Brasil); Otília Maria Alves da Nóbrega Alberto Dantas (UnB/Brasil), Guilherme Antônio Lopes de Oliveira (CHRISFAPI - Cristo Faculdade do Piauí).

Sumário

| | |
|---|----|
| APRESENTAÇÃO | 7 |
| Capítulo 01 | 8 |
| APLICAÇÃO DO MÉTODO “KASHIMA COAT” PARA ANÁLISE EM COMPONENTE DE BICICLETA | |
| LUCAS SILVA COSTA, WÊNIO FHARÁ ALENCAR BORGES, RÔMULO RIBEIRO MAGALHÃES DE SOUSA, ANDRÉ SALES AGUIAR FURTADO, FILIPI MACIEL DE MELO, IGOR ANTONIO DE OLIVEIRA CARVALHO | |
| Capítulo 02 | 21 |
| ANÁLISE DE VIBRAÇÕES APLICADA NA MANUTENÇÃO DE AEROGERADORES: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | |
| WÊNIO FHARÁ ALENCAR BORGES, LUIZ HENRIQUE PORTELA DE ABREU, RENATA PORTELA DE ABREU, VICTOR HUGO LOBO CORREIA, RENAN MATOS MONÇÃO, FILIPI MACIEL DE MELO, IGOR ANTONIO DE OLIVEIRA CARVALHO | |
| Capítulo 03 | 33 |
| PROJETO MECÂNICO DE UM SISTEMA AUTÔNOMO HÍBRIDO DE BATERIA PV-EÓLICO-DIESEL-BATERIA PARA UM RESTAURANTE NO BRASIL | |
| WÊNIO FHARÁ ALENCAR BORGES, ANDRÉ SALES AGUIAR FURTADO, FILIPI MACIEL DE MELO, IGOR ANTONIO DE OLIVEIRA CARVALHO | |
| Capítulo 04 | 48 |
| ESTUDO DE ECONÔMICO DE VIABILIDADE DE SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO PARA UM BLOCO DE ENSINO DE UMA UNIVERSIDADE PÚBLICA | |
| WÊNIO FHARÁ ALENCAR BORGES, IGOR GUILHERME NASCIMENTO SILVA, KLÉBER LIMA CÉZAR, PETTESON LINNIKER CARVALHO SERRA, ANDRÉ SALES AGUIAR FURTADO, FILIPI MACIEL DE MELO, IGOR ANTONIO DE OLIVEIRA CARVALHO | |
| Capítulo 05 | 59 |
| APLICAÇÃO DE PROJETO MECÂNICO NO DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA ÁREAS RURAIS | |
| WÊNIO FHARÁ ALENCAR BORGES, ANDRÉ SALES AGUIAR FURTADO, FILIPI MACIEL DE MELO, IGOR ANTONIO DE OLIVEIRA CARVALHO | |
| Capítulo 06 | 71 |
| IMPORTÂNCIA DA METROLOGIA NA FORMAÇÃO DO ENGENHEIRO MECÂNICO | |
| WÊNIO FHARÁ ALENCAR BORGES, ANDRÉ SALES AGUIAR FURTADO, FILIPI MACIEL DE MELO, IGOR ANTONIO DE OLIVEIRA CARVALHO | |
| Capítulo 07 | 78 |
| CARACTERIZAÇÃO E DESEMPENHO DO AÇO AISI M2 APÓS APLICAÇÃO DA NITRETAÇÃO POR PLASMA VISANDO APLICAÇÕES EM FERRAMENTAS DE CONFORMAÇÃO | |
| LUIZ HENRIQUE PORTELA DE ABREU, WÊNIO FHARÁ ALENCAR BORGES, RÔMULO RIBEIRO MAGALHÃES DE SOUSA, ANDRÉ SALES AGUIAR FURTADO, FILIPI MACIEL DE MELO, IGOR ANTONIO DE OLIVEIRA CARVALHO | |
| Capítulo 08 | 90 |
| AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE APLICAÇÃO DO AÇO D2 REVESTIDO COM FILME CARBONOSO PARA USO EM FERRAMENTAS DE TRABALHO A FRIO | |
| PETTESON LINNIKER CARVALHO SERRA, WESLLEY RICK VIANA SAMPAIO, WÊNIO FHARÁ ALENCAR BORGES, RENAN MATOS MONÇÃO, RÔMULO RIBEIRO MAGALHÃES DE SOUSA, FILIPI MACIEL DE MELO, IGOR ANTONIO DE OLIVEIRA CARVALHO | |

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS PARA AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 E SUAS DEFORMAÇÕES RESULTANTES DE TESTES DE TENSÃO EM DIFERENTES TEMPERATURAS, VELOCIDADES E DIREÇÕES DE LAMINAÇÃO

WÊNIO FHARÁ ALENCAR BORGES, ANDRÉ LUÍS RODRIGUES SANTANA, YURI JOSÉ LUZ MOURA, LUIZ HENRIQUE PORTELA DE ABREU, ANDRÉ SALES AGUIAR FURTADO, FILIPI MACIEL DE MELO, IGOR ANTONIO DE OLIVEIRA CARVALHO

ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL ARGILOSO PARA APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

WÊNIO FHARÁ ALENCAR BORGES, LUIZ HENRIQUE PORTELA DE ABREU, RENAN MATOS MONÇÃO, RÔMULO RIBEIRO MAGALHÃES DE SOUSA, ANDRÉ SALES AGUIAR FURTADO, FILIPI MACIEL DE MELO, IGOR ANTONIO DE OLIVEIRA CARVALHO

SOBRE OS ORGANIZADORES

WÊNIO FHARÁ ALENCAR BORGES, FILIPI MACIEL DE MELO, IGOR ANTONIO DE OLIVEIRA CARVALHO

ÍNDICE REMISSIVO

APRESENTAÇÃO

A engenharia mecânica como campo de estudo é uma das poucas áreas que possuem uma vasta aplicação em diversos setores da economia. Passamos por constantes mudanças tecnológicas cotidianamente e a engenharia mecânica acompanha esses avanços. As suas áreas de atuação vão desde a concepção de materiais até a execução dos projetos, não somente na área de materiais, como também nas áreas térmica e de projetos mecânicos.

Especificamente na área de materiais, diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos em diferentes partes do nosso país. Alguns estudos apresentam técnicas de melhoramentos superficiais visando ampliar a sua vida útil, reduzindo custos, etc. Outros buscam avaliar a aplicação de revestimentos e sua influência nas propriedades mecânicas, ou mesmo, na caracterização de materiais.

Em relação às áreas térmica e de projetos mecânicos, a primeira tem se dedicado ao estudo conceitual e sua aplicação voltados aos assuntos de ar condicionado e refrigeração, e mais recentemente, ao estudo e aplicação da energia solar, especificamente em relação ao aproveitamento de energia. Quanto ao segundo, projetos mecânicos, os trabalhos publicados são inovadores, pois aplicam a engenharia mecânica na concepção ou aperfeiçoamento de novos produtos.

Nesse viés, esta obra “Engenharia mecânica e suas aplicações” tem relevante importância para os profissionais da área de engenharia mecânica devido aos diversos estudos aqui apresentados, mostrando uma ampla aplicação em suas diversas subáreas de estudo. Certamente, é um material que vem para adicionar conhecimentos para novos profissionais e os já atuantes. Boa leitura!

Igor Antonio de Oliveira Carvalho

Filipi Maciel de Melo

Wênio Fhará Alencar Borges

(Organizadores)

Capítulo 01

APLICAÇÃO DO MÉTODO “KASHIMA COAT” PARA ANÁLISE EM COMPONENTE DE BICICLETA

LUCAS SILVA COSTA¹, WÊNIO FHARÁ ALENCAR BORGES², RÔMULO RIBEIRO MAGALHÃES DE SOUSA³, ANDRÉ SALES AGUIAR FURTADO⁴, FILIPI MACIEL DE MELO⁵, IGOR ANTONIO DE OLIVEIRA CARVALHO⁶

RESUMO

O método “*Kashima coat*” é uma técnica de anodização dura, que implica na formação de uma camada responsável por reduzir o atrito, auxiliando na atenuação de características abrasivas. Essa anodização é aplicável a peças mecânicas como superfícies de pistões, alguns tipos de engrenagens e principalmente em suspensões de alumínio. O presente trabalho visa analisar de forma mais profunda, a superfície da região de “*station tube*”, conhecido como bengala, na suspensão dianteira de bicicletas, que em virtude de descontinuidades na coloração âmbar, levanta dúvidas quanto a origem dessas falhas. A análise tem como objetivo indicar se as falhas superficiais aconteceram em função de ausência de lubrificação, manutenção correta do cliente, ou defeito de fabricação.

Palavras-Chave: Kashima coat, bengala de suspensão, descontinuidades.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, com o avanço das tecnologias, as empresas buscam por melhorias nos seus processos e serviços oferecidos a seus clientes, de modo a satisfazê-los, proporcionando melhor qualidade e baixo custo. Quando falamos em acabamento, a variável mais importante é a rugosidade. Mesmo com toda a automatização dentro das empresas do ramo, ainda é preciso verificar se os produtos desenvolvidos se encontram dentro dos padrões de qualidade e tolerância esperados (Hammes et al., 2017).

O acabamento de uma superfície é a combinação de vários fatores: rugosidade, ondulações e falhas. Ondulações são erros geométricos ou basicamente irregularidades superficiais cujos espaçamentos são maiores que as rugosidades. São causadas por vibrações e

¹Mestre em Engenharia dos Materiais (IFPI), Instituto Federal do Piauí – IFPI, Teresina-PI.

E-mail: lucasp3r9d8@hotmail.com

²Mestre em Engenharia Mecânica (UFPE), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Pedreiras, Pedreiras-MA.

E-mail: wenio.borges@ifma.edu.br

³Doutor em Ciência e Engenharia dos Materiais (URFN), Universidade Federal do Piauí – UFPI, Teresina-PI.

E-mail: romulorms@gmail.com

⁴Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais (UFPI), Universidade Federal do Piauí – UFPI, Teresina-PI.

E-mail: salesandre7@gmail.com

⁵Mestre em Engenharia Mecânica (UFPA), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Timon, Timon-MA.

E-mail: filipi.melo@ifma.edu.br

⁶Mestre em Engenharia de Materiais (IFPI), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Timon, Timon-MA.

E-mail: igor.carvalho@ifma.edu.br

flexões da ferramenta ou da peça, devido à força de usinagem, temperatura de corte ou a erros de fixação da peça ou da ferramenta.

O desgaste é um termo amplo que engloba vários tipos de falhas, todas envolvendo alterações na superfície da peça. A maior parte das superfícies sólidas que são submetidas a desgaste em máquinas é usinada ou retificada, ainda que algumas mantenham suas superfícies finais dos processos de fundição ou forjamento. Em qualquer um desses casos, a superfície terá algum grau de rugosidade que é compatível com seu processo de acabamento. Seu grau de rugosidade terá influência tanto no tipo como na intensidade de desgaste a que a peça estará sujeita. Mesmo superfícies uniformes e aparentemente lisas têm irregularidades microscópicas. Estas podem ser medidas por qualquer um dos vários métodos disponíveis (Norton, 2013).

Hammes et al. (2017), tomando como base o estudo de Agostinho et al. (1977), cita que a rugosidade superficial está ligada na importância do acabamento e na precisão de ajustes entre as peças a serem acopladas. O acabamento superficial das peças é medido através da rugosidade superficial, onde é expressa em microns. A medição da rugosidade ocorre através de um equipamento chamado rugosímetro.

A rugosidade superficial é dada em função do tipo de acabamento ou da máquina-ferramenta. Segundo a análise geométrica dos desvios da superfície real, temos:

- a) Erros macrogeométricos ou erros de forma – podem ser mensurados com instrumentos convencionais;
- b) Erros microgeométricos ou rugosidade – só podem ser mensurados através de aparelhos especiais, como por exemplo: rugosímetros, perfilógrafos, perfiloscópios, etc.

Uma das grandezas fundamentais na medição da rugosidade ainda de acordo com Agostinho et al. (1977, p.197) *apud* Hammes et al. (2017), é o comprimento de amostragem, que nada mais é do que o “comprimento medido na direção geral do perfil, suficiente para avaliação dos parâmetros de rugosidade”. Dentre essas grandezas temos ainda o perfil efetivo, que se conceitua pela intersecção da superfície efetiva com o plano gerado perpendicularmente a superfície geométrica da peça.

Pode-se esperar que a rugosidade superficial também tenha grande influência sobre o coeficiente de atrito. Experimentos, contudo, mostram apenas uma fraca correlação. Com acabamentos superficiais extremamente finos, correspondentes a uma faixa de rugosidade média, R_a , inferior a 10×10^{-6} in, o coeficiente de atrito μ realmente aumenta até um fator próximo de 2, devido a um aumento na área real de contato. Com acabamentos muito grosseiros, correspondentes a R_a acima de 50×10^{-6} in, μ também aumenta levemente devido à energia necessária para suplantarem interferências entre asperezas (sulcamento), bem como para cisalhar as ligações adesivas formadas durante o escorregamento (Norton, 2013). Assim, pode-se afirmar que o coeficiente de atrito não influencia tão negativamente na rugosidade superficial.

1.1. Técnica de anodização

Alumínio anodizado e suas ligas é amplamente utilizado como método de acabamento superficial para proteção contra corrosão e redução de atrito, melhorando as propriedades mecânicas (Hu et. al, 2016), expressando propriedades químicas e físicas (Song et. al, 2013).

Dentre as diversas vantagens da anodização, podemos mencionar,

- ✓ Durabilidade: a maior parte dos produtos anodizados têm um tempo de vida extremamente longo oferecendo vantagens significativas do ponto de vista econômico e de manutenção;
- ✓ Estabilidade da cor: o exterior da camada anódica é bastante estável aos raios ultravioletas sem lascar nem descascar;
- ✓ Facilidade de manutenção: superfícies fáceis de limpar com água e sabão, restaurando a aparência original. Um abrasivo médio pode eventualmente ser utilizado para remover depósitos mais aderentes;
- ✓ Estética: a anodização oferece um largo leque de polimentos e de colorações. A anodização do alumínio permite manter o aspecto metálico da peça;
- ✓ Custos: os baixos preços iniciais combinam-se com os baixos custos de manutenção e o longo tempo de vida da peça;
- ✓ Segurança: a anodização é segura para a saúde. A anodização é estável do ponto de vista químico, não se decompõe, não é tóxico e é resistente à temperatura.

A anodização do alumínio conduz à formação do óxido de alumínio convertendo a superfície do alumínio numa superfície extremamente dura com as seguintes propriedades:

- Resistência à corrosão;
- Resistência à abrasão;
- Dureza;
- Resistência à água; e
- Resistência elétrica.

O óxido anódico em particular é muito importante para proteger o substrato de alumínio em várias aplicações industriais, tais como materiais estruturais e componentes mecânicos. Estes revestimentos anódicos duros fornecem produtos de alumínio de longa duração e expansão de suas aplicações, dentre elas:

- Indústria automóvel;
- Construção de edifícios;
- Aviação;
- Joalheria;
- Eletrônica;
- Armamento;
- Marinha;

- Energia;
- Aparelhagem médica;
- Indústria têxtil, etc.

No processo de anodização, o alumínio funciona como ânodo e um outro metal ou o carbono funciona como cátodo. O eletrólito dentro do qual é colocado o alumínio é geralmente ácido sulfúrico ou ácido crômico. Uma corrente elétrica é aplicada aos elementos que compõem o processo e convertem a superfície do alumínio em um revestimento de óxido de alumínio. É possível também incorporar cores ao processo de anodização. Os revestimentos de óxido assim obtidos apresentam muito boa resistência à abrasão, excelente proteção contra corrosão e boa rigidez dielétrica.

A anodização possui espessura de óxido de barreira típico com cerca de dezenas ou centenas de nanômetros (Kikushi et. al, 2015). Portanto, não é adequado para a produção de revestimentos anódicos duros em alumínio. Por outro lado, anodização de alumínio em soluções ácidas tais como ácido sulfúrico, oxálico, fosfórico e crômico resultam na formação de uma película de óxido poroso (alumina porosa) com uma única célula hexagonal e estrutura com poros em nanoescala (Stępniewski et. al, 2014). Essa alumina porosa grossa de dezenas de micrômetros de espessura pode ser facilmente formada por anodização a longo prazo em soluções ácidas.

A alumina porosa é amplamente utilizada para o acabamento superficial de alumínio e suas ligas, e faz parte da técnica de anodização *Kashima Coat*.

1.2. Anodização dura

A anodização dura representa um tratamento interessante e útil, capaz conferir às ligas de alumínio, propriedades mecânicas de superfície elevadas como boa microdureza e resistência ao desgaste, além das propriedades essenciais de proteção e resistência à corrosão por meio da natureza do óxido de alumínio (Bozza et. al, 2015).

Neste processo, obtêm-se camadas consideravelmente mais duras do que as clássicas. A dureza dessas camadas é comparável à do cromo duro, tendo uma elevada resistência à abrasão. Em virtude de sua maior espessura, as camadas duras de óxido de alumínio são de coloração cinza-claros ou até cinza-pretos, variando de acordo com a liga. Sua aplicação destina-se a casos especiais (fins técnicos), onde são desejadas grande dureza superficial, grande resistência ao desgaste.

Este tipo de anodização não pode ser aplicado em peças que sofram choques térmicos consideráveis, pois a película se romperia sob o efeito das fortes dilatações (ABAL, 1996).

Para Skeldon et. al (1996), o complemento da anodização dura inicial para a formação de alumina se dá a partir da adição de bissulfeto de molibdênio (MoS_2), a fim de se adquirir espessura ideal de dezenas de micrômetros, e garantindo o mínimo de coeficiente de fricção, penetrando-se em microporos a partir do fundo de cada célula por imagem, melhorando-se,

portanto, a resistência à corrosão comparado a anodização dura convencional, que acontece em outros tipos comuns de revestimento como bissulfeto de teflon, grafite e tungstênio. A Fig. 1 a seguir é baseada no artigo de Skeldon et. al (1996) e reproduz igualmente o que é exibido no site da Miyaki CO. LTD., pioneira no método *Kashima Coat*.

1.3. Microscopia óptica

De acordo com Santos (2016), em diversos estudos é necessária a observação meticulosa da superfície da amostra para compreender o processo que ocorre. O microscópio óptico supre essa necessidade e é popularmente utilizado em observações das superfícies, na metalografia e estudos de corrosão, com o uso de lentes que ampliam de 10, 50, 100, 400 até 1000 vezes a imagem da luz proveniente da superfície visualizada.

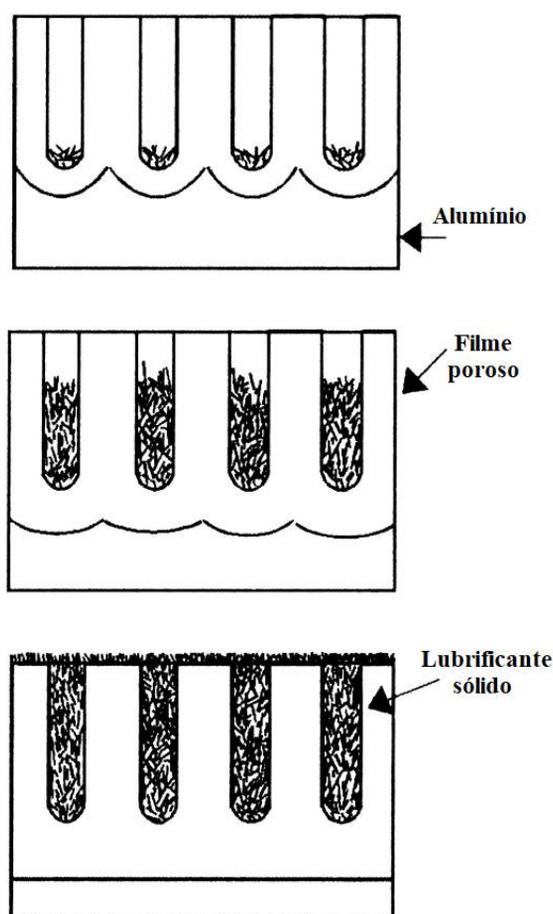


Figura 1 – Ilustração esquemática do modelo sugerido para a formação de lubrificante de sulfureto de molibdênio dentro e acima das películas porosas.

Fonte: Autor, 2019 (adaptada).

Ainda segundo Santos (2016), no estudo metalográfico normalmente se utiliza o microscópio metalográfico para se observar as microestruturas da amostra após o ataque do reagente químico. Este equipamento apresenta duas variações na observação da amostra, podendo ser de cima para baixo ou de baixo para cima (microscópio metalográfico invertido).

A utilização do processamento digital de imagens está auxiliando na análise e classificação no estudo de corrosão. A compreensão, por meio desta técnica, contribui para a

interpretação e como ocorre o ataque no processo corrosivo. O uso de imagens em pesquisas e monitoramentos já são utilizadas há algum tempo em outros campos de pesquisa como a medicina, biologia e outros, mas para o estudo de corrosão é relativamente recente. O uso das imagens da superfície corroída fornece informações valiosíssimas sobre o crescimento da corrosão localizada, na determinação da profundidade, o tamanho/área na superfície do material que foi corroída e a sua distribuição espacial. A análise de imagens torna-se, assim, uma ferramenta de caracterização qualitativa e quantitativa nos passos iniciais e seguintes para o entendimento do processo de corrosão (Santos, 2016).

1.4. A bicicleta

Santos e Valenga (2016) abordaram com êxito toda a história da bicicleta, desde o seu surgimento. Eles afirmaram que com a revolução industrial, diversas novas implementações foram desenvolvidas. A bicicleta começou a ser aceita como um veículo eficiente de locomoção com a criação de um mecanismo eficiente de conversão de energia, através dos pedais, que recebem a força aplicada pelas pernas do condutor e transmite a uma das duas rodas.

Em décadas de evolução, a primeira bicicleta moderna – semelhante aos modelos da atualidade - surgiu no final do século XIX. Nessa época os novos modelos já possuíam pedais na base do quadro, corrente de transmissão de tração ligados para o eixo da roda traseira através de coroa e catraca, pneus de borracha com câmara de ar, rodas de mesmo aro, entre outros itens.

No século XX as bicicletas continuaram a evoluir para atender as necessidades dos ciclistas. Com o aumento da popularidade e a diversificação do uso, começaram a ser desenvolvidas bicicletas específicas para o tipo de terreno e aplicação que a mesma terá. Dentre essas, foi concebida a bicicleta de estrada.

As bicicletas de estrada, também conhecidas como “*road bikes*” ou “*speed*” são bicicletas para uso esportivo, focando na velocidade e viagens de longa duração. Elas são indicadas para uso no asfalto, possuem pneus estreitos e o guidão curvo. Para atender a essas necessidades, bicicletas desse tipo são mais leves do que as outras, possuem formato aerodinâmico, rodas estreitas e grande aproveitamento da energia aplicada aos pedais.

Em mais de 100 anos de evolução desde o final do século XIX, o formato da bicicleta não sofreu grandes alterações. Acredita-se que esse formato seja o mais eficiente, no qual apenas 1% da energia transmitida das pernas à roda traseira se perde, o que torna possível ao ciclista manter facilmente a marcha entre 16 e 19 quilômetros por hora, isto é, quase quatro vezes a velocidade do caminhar. Devido a disso, as maiores implementações desenvolvidas no século XX e disponibilizadas no mercado foram em outras áreas da bicicleta como o material do quadro, o tipo de freio, câmbio, aerodinâmica, entre outros.

1.5. Objetivos

O presente trabalho visa analisar de forma mais profunda, a superfície da região de “station tube”, conhecido como bengala, na suspensão dianteira de bicicletas, que em virtude de descontinuidades na coloração âmbar, levanta dúvidas quanto a origem dessas falhas. A análise tem como objetivo indicar se as falhas superficiais aconteceram em função de ausência de lubrificação, manutenção correta do cliente, ou defeito de fabricação.

2. METODOLOGIA

A análise inicia-se com a investigação de possível causa para surgimento de descontinuidades na camada superficial da região chamada de “station tube”, conhecida como bengala, que para a amostra analisada, possui cor âmbar. Essas descontinuidades se apresentam na cor metálica identificando o substrato que sofre anodização, no caso o alumínio. A Fig. 2, a seguir, mostra a bengala da suspensão e as falhas aparentes, além das regiões com descontinuidades.

Assim como a amostra da Fig. 2, diversas reclamações reportadas por clientes, ocorreram com as mesmas características. A primeira característica analisada é o aspecto de descascado, atípico a defeitos recorrentes de abrasão, como o atrito causado pela lubrificação inadequada ou presença de corpos estranhos no curso de deslizamento, como areia, cascalho entre outros, que normalmente apresenta aspecto lixado no sentido longitudinal ao tubo.

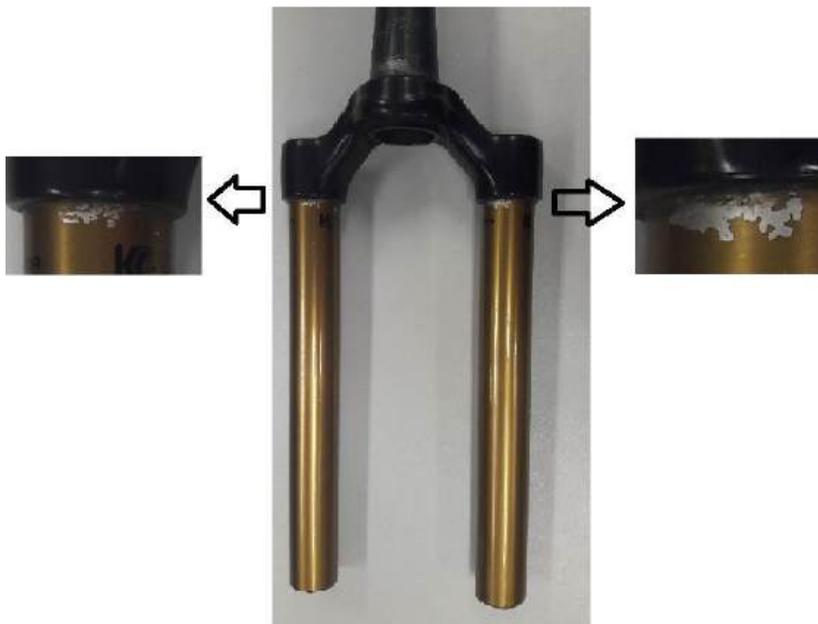


Figura 2 – Região com descontinuidades de camada superficial.

Fonte: Autor, 2019.

Como a análise visual causa tendência natural ao erro e varia de analista para analista, é válido destacar que uma segunda característica reforça a hipótese levantada por essa primeira

característica, o curso total de deslizamento da suspensão. Para a análise da influência desse curso total, se faz necessário a compreensão das partes que compõem uma suspensão, no caso a referente a roda dianteira da bicicleta. A Fig. 3 mostra a composição da suspensão analisada.



Figura 3 – Partes componentes de suspensão dianteira analisada.

Fonte: Autor, 2019 (adaptada).

O deslizamento acontece entre a parte chamada de *monoligh*, conhecida como canela, que entra em contato com a bengala. O atrito causa desgaste na camada superficial, porém esse desgaste só pode acontecer na região que ocorre o contato, a Fig. 4 mostra o máximo de curso alcançável na bengala.



Figura 4 – Máxima compressão da suspensão.

Fonte: Autor, 2019.

O máximo de compressão representado na imagem mostra que justamente a região retratada na Fig. 2, é a região que não sofre nenhum tipo de atrito. Logo a probabilidade de as descontinuidades serem causadas por desgaste são eliminadas.

Logo, a análise da camada se mostra como alternativa viável para verificação dos parâmetros fornecidos pelo fabricante. Para a análise, a amostra foi examinada em laboratório de engenharia de materiais, da Universidade Federal do Piauí (UFPI), onde uma amostra com descontinuidades foi examinada nas regiões onde não ocorrera essas falhas, para análise geral da camada.

2.1. Procedimento experimental

Inicialmente, foi cortado um pedaço do tubo com o revestimento, onde o mesmo foi embutido em resina acrílica, depois foi lixado em lixas d'água com as seguintes granulometria (em MESH):

- ✓ 200;
- ✓ 320;
- ✓ 400;
- ✓ 600; e
- ✓ 1200.

Logo após, as amostras foram polidas em disco de feltro com pasta diamante (3 μ m) e fluido lubrificante para limpeza e acabamento, até a superfície do metal ficar com a aparência lustrosa.

Após o polimento da superfície seccionada e antes dos ensaios de imagem, a amostra foi atacada com reagente Nital a 4%. O ataque foi executado por esfregação até que a superfície do aço ficasse opaca. O ataque foi feito com o intuito de revelar a camada do filme depositado, tornando possível a medida de espessura.

Em seguida, foi realizado o ensaio de microscopia ótica. Esta técnica foi utilizada para mostrar em grande escala as imagens das camadas a fim de medi-las. As imagens foram capturadas na secção transversal da amostra para revelar a espessura da camada. O procedimento foi executado com o equipamento da marca *Bel Photonics* modelo MTM-1.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos resultados obtidos no microscópio óptico, obteve-se as imagens que revelavam três regiões distintas:

- 1) a região superior exibindo a resina de embutimento;
- 2) a região inferior referente ao substrato de alumínio; e
- 3) a região entre essas, referente a camada resultado da anodização por meio de técnica *Kashima Coat*.

A camada é medida com auxílio do software *ScopImage 9.0*, e são mostradas nas Figs. 5, 6 e 7, a seguir.

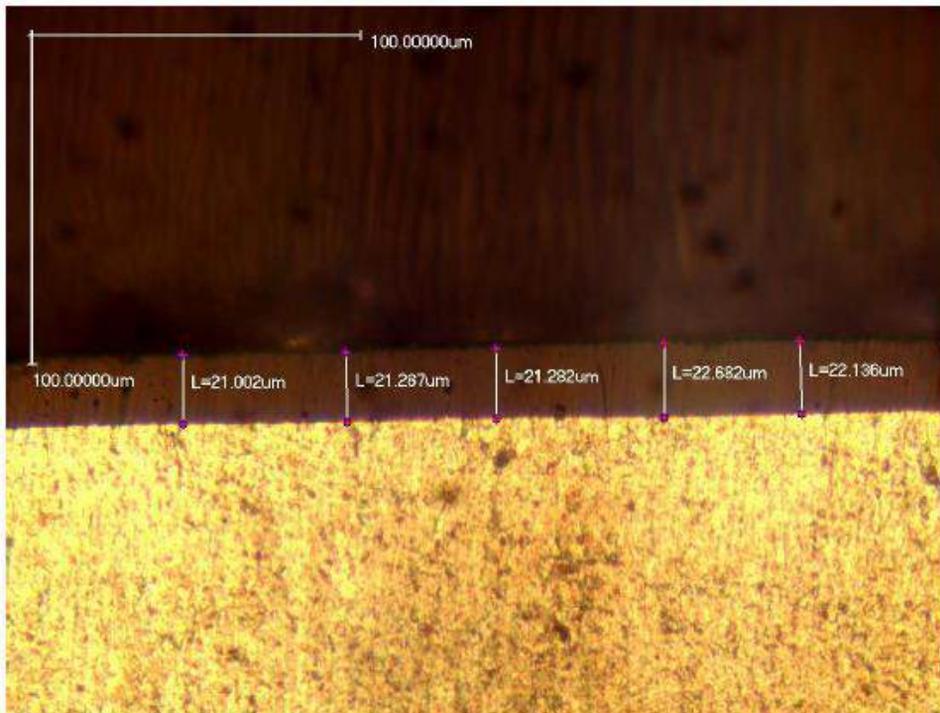


Figura 5 – Microscopia 01 de camada de bengala.

Fonte: Autor, 2019.

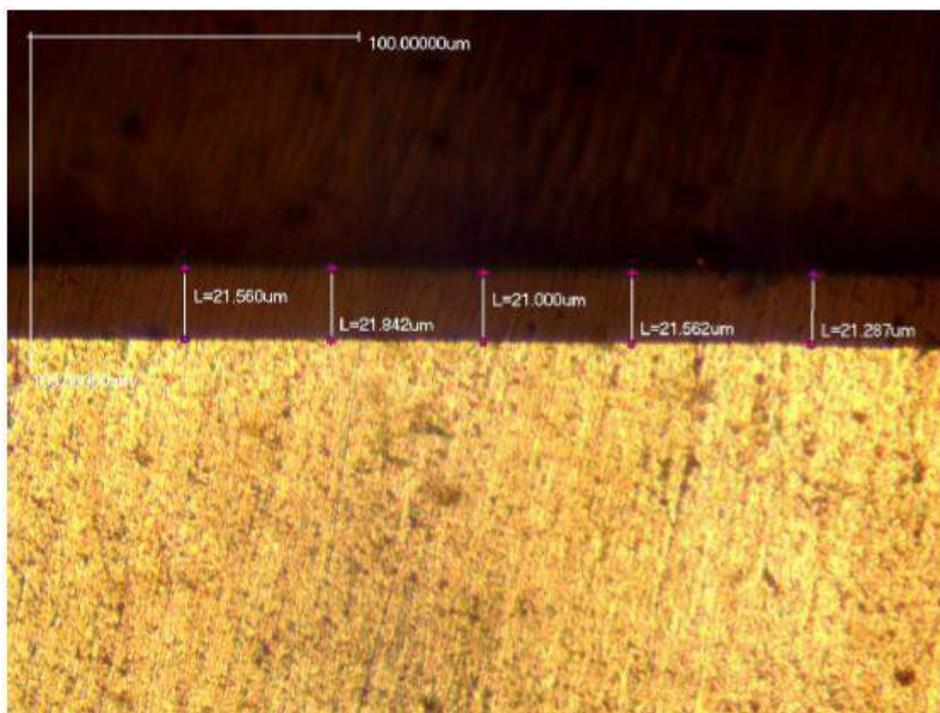


Figura 6 – Microscopia 02 de camada de bengala.

Fonte: Autor, 2019.

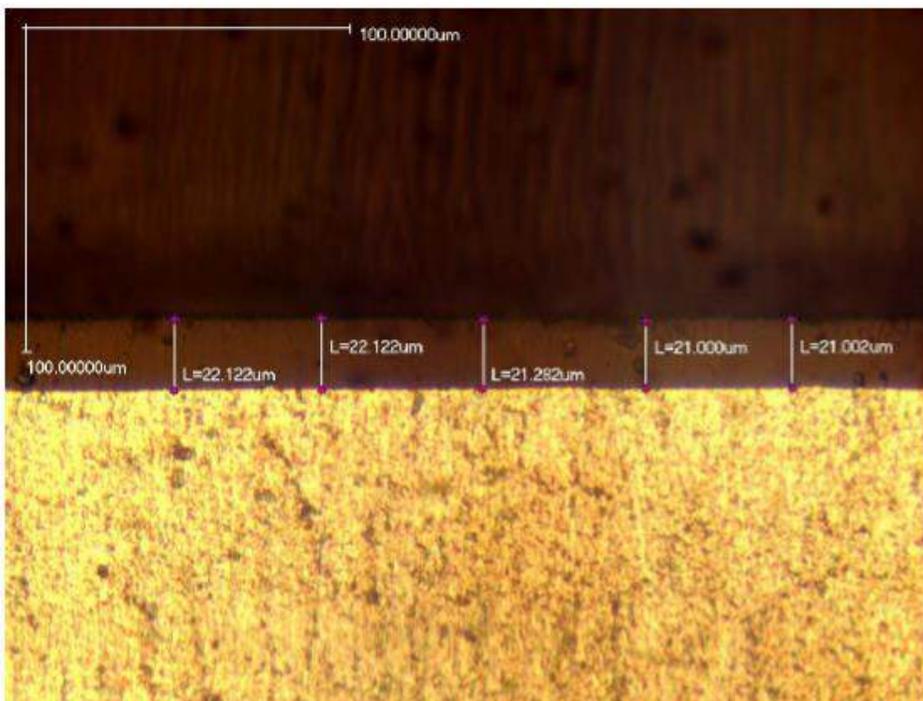


Figura 7 – Microscopia 03 de camada de bengala.

Fonte: Autor, 2019.

Analisando de uma forma mais detalhada, as figuras mostram camadas variando entre 21,00 e 21,89 μm de espessura, onde para cruzar os dados, utilizou-se da Tab. 1 (Anexo), na qual é fornecida pela empresa pioneira na utilização da técnica *Kashima Coat*.

Essa tabela a seguir mostra a variação de espessura da camada para os tipos de substratos que são aderidos a anodização dura.

O material substrato em questão se trata do alumínio da série 7000 fornecido pela FOX, que nessa tabela é correspondente a liga de alumínio A7075.

A Tab. 1 exibida acima possui como tradução para essa liga, o seguinte: “O material é extremamente resistente à corrosão, mas essa resistência, torna-o suscetível à uma corrosão interna ocasionada por seu conteúdo de Cu e Zn. Filmes espessos de 20 μm ou superiores podem descascar”.

4. CONCLUSÕES

Em termos de acabamento superficial, há vários fatores que influenciam o estado de uma superfície, como rugosidade, ondulações e falhas.

O desgaste é um termo que engloba vários tipos de falhas, onde a maioria delas são provenientes do processo de fabricação.

A anodização dura é uma técnica de revestimento superficial, na qual tem o método “Kashima coat” como uma de suas vertentes, nesse processo. Esse método implica na formação de uma camada responsável por reduzir o atrito, auxiliando na atenuação de características abrasivas.

A anodização em si, é aplicável a peças mecânicas como superfícies de pistões, alguns tipos de engrenagens e principalmente em suspensões de alumínio.

Assim, este presente trabalho buscou analisar de forma mais profunda, a superfície da região de “station tube”, conhecido como bengala, na suspensão dianteira de bicicletas, que em virtude de descontinuidades na coloração âmbar, levanta dúvidas quanto a origem das falhas que apresentam neste componente.

A análise teve como objetivo indicar se as falhas superficiais aconteceram em função de ausência de lubrificação, manutenção correta do cliente, ou defeito de fabricação.

Constatou-se que a bengala de suspensão para roda dianteira utilizada em bicicletas, que possui revestimento bissulfeto de molibdênio (MoS_2) em substrato de liga de alumínio da série 7000, no caso o alumínio A7075, com auxílio de cerâmico poroso a base de alumina (Al_2O_3), pelo processo de anodização dura chamado de Kashima Coat, possui camada entre 21,00 e 21,89 μm de espessura, que ocasiona defeito de descascamento, caracterizado pelas descontinuidades na coloração âmbar, típica desse revestimento.

Logo, essas descontinuidades são causadas por formação de espessura de camada, não indicada para o processo, acima do indicado, 15 μm de espessura, com formação acima dos 20 μm , ou seja, caracterizando-se erro de fabricação.

5. REFERÊNCIAS

- ABAL - Comissão Técnica da Associação Brasileira do Alumínio. 1996. **Guia técnico do alumínio – Tratamento de superfície**, p. 179.
- Agostinho, O. L., Rodrigues, A. C. S., Lirani, J. 1977. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. São Paulo: Edgar Blücher.
- Bozza, A., Giovanardi, R., Manfredini, T., Mattioli, P. 2015. **Pulsed current effect on hard anodizing process of 7075-T6 aluminium alloy**. Surface & Coatings Technology, 270, 139-144.
- Hammes, J. M.; Rosa, A. F. P.; Walker, E. 2017. **Otimização do acabamento superficial no torneamento cilíndrico externo de um aço SAE 1045**. Revista GEPROS, 12(2), 138-156.
- Hu, Z., Shrestha, M., Fan, Q.H. 2016. **Nanomechanical characterization of porous anodic aluminum oxide films by nanoindentation**. Thin Solid Films, 598, 131-140.
- Kikuchi, T., Nakajima, D., Nishinaga, O., Natsui, S., Suzuki, R. O. 2015. **Porous aluminum oxide formed by anodizing in various electrolyte species**. Current Nanoscience, 11, 560-571.
- Norton, R. L. 2013. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4ª ed. Porto Alegre: Bookman.
- Santos, R. D. M. 2016. **Investigação da corrosão do aço carbono AISI 1020 em soluções de NaCl utilizando microscopia óptica *in situ***. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em química, UFSCAR.
- Santos, A. T. M., Valenga, L. S. 2016. **Análise estrutural de quadros de bicicleta utilizando o método dos elementos finitos**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR.

Song, M., Liu, Y., Cui, S., Liu, L., Yang, M. 2013. **Fabrication and icing property of superhydrophilic and superhydrophobic aluminum surfaces derived from anodizing aluminum foil in a sodium chloride aqueous solution.** Applied Surface Science, 283, 19-24.

Skeldon, P. U., Wang, H. W., Thompson, G. E. 1997. **Formation and characterization of self-lubricating MoS₂ precursor films on anodized aluminium.** Wear, 206, 187-196.

Stępniewski, W. J., Michalska-Domańska, M., Norek, M. M., Czujko, T. 2014. **Fast Fourier transform based arrangement analysis of poorly organized alumina nanopores formed via self-organized anodization in chromic acid.** Materials Letters, 117, 69-73.

Yanagishita, T., Masuda, H. 2015. **High-throughput fabrication process for highly ordered through-hole porous alumina membranes using two-layer anodization.** Electrochimica Acta, 184, 80-85.

Capítulo 02

ANÁLISE DE VIBRAÇÕES APLICADA NA MANUTENÇÃO DE AEROGERADORES: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

WÊNIO FHARÁ ALENCAR BORGES¹, LUIZ HENRIQUE PORTELA DE ABREU², RENATA PORTELA DE ABREU³, VICTOR HUGO LOBO CORREIA⁴, RENAN MATOS MONÇÃO⁵, FILIPI MACIEL DE MELO⁶, IGOR ANTONIO DE OLIVEIRA CARVALHO⁷

RESUMO

A busca pela geração de energia elétrica vem crescendo em larga escala em todos os países, mas são os países em desenvolvimento, como o Brasil, que se percebe o crescimento acentuado no cenário nacional e internacional. O país já possui mais de 60% de sua geração a partir de hidrelétricas que é sustentável, mas tem suas desvantagens por inundar grandes áreas, prejudicando a fauna e a flora, e ainda depender da situação hídrica a cada ano. A partir desse cenário, surge as fontes renováveis provenientes do sol (solar fotovoltaica) e do vento (eólica), que não prejudicam o meio ambiente. Neste trabalho, objetivou-se analisar através de uma revisão bibliográfica como a manutenção preditiva está atuando no cenário da energia eólica, especificamente em aerogeradores (ou turbinas eólicas), buscando detectar falhas ocultas nos seus componentes. Dentre as técnicas preditivas, a análise de vibrações foi a mais utilizada por autores como SEQUEIRA (2012) e ALMEIDA (2016), justamente com a finalidade de otimizar a manutenção em aerogeradores e detectar falhas de modo a evitar manutenções não planejadas. Concluiu-se que é de grande importância a aplicação da manutenção preditiva e que a análise de vibrações realmente é uma boa técnica quando se quer sanar falhas em componentes de aerogeradores.

Palavras-chave: Aerogeradores, manutenção preditiva, análise de vibrações.

¹Mestre em Engenharia Mecânica (UFPE), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Pedreiras, Pedreiras-MA.

E-mail: wenio.borges@ifma.edu.br

²Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais (UFPI), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM, Campus Manaus Distrito Industrial, Manaus-AM.

E-mail: luizhabreu92@gmail.com

³Mestranda em Engenharia Mecânica (UFPB), Universidade Federal da Paraíba – UFPB, João Pessoa-PB.

E-mail: re.portela96@gmail.com

⁴Mestranda em Engenharia Mecânica (UFPB), Universidade Federal da Paraíba – UFPB, João Pessoa-PB.

E-mail: victorloboc@gmail.com

⁵Mestrando em Ciência e Engenharia dos Materiais (UFPI), Universidade Federal do Piauí – UFPI, Teresina-PI.

E-mail: renanmatos962010@gmail.com

⁶Mestre em Engenharia Mecânica (UFPB), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Timon, Timon-MA.

E-mail: filipi.melo@ifma.edu.br

⁷Mestre em Engenharia de Materiais (IFPI), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Timon, Timon-MA.

E-mail: igor.carvalho@ifma.edu.br

1. INTRODUÇÃO

A busca por fontes renováveis para geração de energia elétrica vem crescendo mundialmente. As hidrelétricas são as principais geradoras de eletricidade em países como o Brasil, e são consideradas uma fonte renovável de eletricidade. Entretanto, sua construção e manutenção através dos ciclos naturais trazem efeitos negativos, como por exemplo, a inundação de grandes áreas, prejudicando e/ou mesmo extinguindo a fauna e a flora.

De acordo com a Perspectiva de Energia Internacional (*International Energy Outlook*) de 2010, divulgado pela Administração de Informações sobre Energia (sigla em inglês, EIA) dos EUA, o consumo mundial de energia renovável vem aumentando a uma taxa de 2,6% ao ano. Em 2008, aproximadamente 19% do consumo global de energia era proveniente de fontes renováveis, 13% da biomassa tradicional (principalmente utilizada para aquecimento), 3,2% das hidroeletricidades e os 2,7% restantes de “novas energias renováveis” em rápido crescimento (por exemplo, pequenas centrais hidrelétricas, biomassa moderna, eólica, solar, geotérmica e biocombustíveis).

Como alternativa para a escolha de uma fonte diferente da hidrelétrica, os países desenvolvidos e em desenvolvimento estão aumentando as suas gerações de eletricidade com a utilização de novas fontes renováveis como a solar fotovoltaica e a eólica, principalmente, que não prejudicam o meio ambiente. Li e Li (2005), afirmam que “as fontes de energia renováveis, incluindo hidrelétrica, eólica, geotérmica, biomassa, ondas, maré e energia térmica oceânica tem atraído uma enorme atenção do mundo inteiro devido suas características quase não-poluentes e inesgotáveis”.

A geração de energia por meio renovável produz aproximadamente 18% da eletricidade global, sendo 15% de energia hidrelétrica e 3% de outras novas fontes de energia renovável. As novas tecnologias de “renováveis” são próprias para a geração local de eletricidade em áreas rurais e remotas, onde os custos de transporte de petróleo bruto ou gás natural e os custos de transmissão de eletricidade são muitas vezes proibitivos (Pao e Fu, 2013).

De acordo com o EIA de 2009, o consumo de energia renovável no Brasil atingiu 97% de sua geração doméstica total de eletricidade, e a taxa de crescimento dos diferentes tipos de consumo de energia é variável. Durante o período de 1980-2009, o novo consumo de energia renovável (ou seja, consumo de energia renovável não-hidrelétrico) com uma taxa de crescimento anual muito alta de 8,72% representou 2,89% do total de energia renovável (TER), enquanto que o consumo de energia hidroelétrico, com uma taxa de crescimento médio anual de 3,66% representaram 97,11% do TER. Adicionalmente, o consumo de energia nuclear, com a taxa média de crescimento anual mais elevada de 19,65%, representou 1,20% do consumo total de energia não-renovável (CTENR), enquanto o consumo de combustíveis fósseis, com a taxa de crescimento média anual mais baixa de 2,85% representaram 96,67% da CTENR.

O Brasil faz parte do grupo de países conhecidos como BRIC (Brasil, Rússia, Índia e China). Esse grupo é formado por países emergentes, que podem se tornar, nos próximos 50 anos, a principal força da economia global (Vieira e Veríssimo, 2009).

Países classificados como economias emergentes são confrontados com demandas por crescimento econômico; pela mudança climática; a falta de energia acessível e sustentável; por insuficiência de recursos de capital, degradação ambiental; a falta de disponibilidade e investimento em tecnologia; a falta de suprimentos alimentares suficientes em áreas remotas; a alta taxa de desemprego; o alto crescimento populacional; a falta de transporte e comunicação (particularmente nas áreas rurais); a falta de infraestrutura na educação; e pobreza (González et al., 2017).

Por outro lado, é provável que a demanda por energia elétrica para o desenvolvimento sustentável aumente nesses países (emergentes), tanto em decorrência do crescimento populacional, quanto da expansão da industrialização e, principalmente, do desenvolvimento social, que gera maior distribuição de renda, e, portanto, maior uso de eletricidade.

Atualmente, o Brasil é uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo. Um país com alta taxa de crescimento ou alta proporção de consumo de energia limpa pode implicar em uma relação interdependente entre o crescimento econômico e o consumo de energia limpa ou a substituíbilidade entre as fontes de energia limpa e não limpa para alcançar uma economia sustentável (Pao e Fu, 2013).

De acordo com o BIG, da ANEEL (2016), o Brasil possui 4567 empreendimentos gerando eletricidade, nos quais as hidrelétricas representam 64,76% de toda a geração frente à 0,02% da fonte solar fotovoltaica e 6,32% da eólica. Assim, percebe-se que embora não seja muito grande a geração a partir da energia solar fotovoltaica e da energia eólica, esta última especialmente está em larga ascensão, principalmente no Nordeste do país, onde a quantidade de parques e fazendas eólicas vem ganhando destaque no cenário nacional, pela quantidade de parques já instalados e que irão se instalar a partir dos recentes leilões que contemplaram grandes áreas em estados do Nordeste.

Ainda no Brasil, a energia eólica em sua configuração atual tem 275 projetos em operação, 105 em construção e 332 a serem construídos (ANEEL, 2015). Parece que há uma quantidade maior de parques eólicos a serem construídos e em construção, superando aqueles em operação. O Nordeste possui mais de 50% do potencial de geração de energia eólica, com destaque para o estado do Rio Grande do Norte com 79 parques em operação, 72 a serem construídos, 24 em construção, dos quais cinco pertencem ao município "A" (codinome município estudado) (ABEEOLICA, 2015; ANEEL, 2015 *apud* González et al., 2017).

A partir deste crescente aumento na geração de eletricidade a partir do vento, utilizando-se turbinas eólicas, é importante destacar que a manutenção industrial precisa acompanhar esse avanço tecnológico no setor elétrico, haja visto que é de suma necessidade que todas as turbinas trabalhem continuamente sem ter que pararem de forma inesperada devido a falhas nos seus componentes.

Dentro de um contexto de efervescência para mitigação de impactos ambientais de fontes renováveis, o Brasil se destaca como o mercado mais progressista da América Latina, com mudanças em seu crescimento nos últimos anos. As perspectivas de parques eólicos com base

na consolidação das capacidades contratadas nos ambientes livre e regulado demonstram que até o final de 2019, 17,7 GW serão instalados no Brasil (González et al., 2017).

Frente a esse cenário, o presente trabalho visa mostrar como a técnica de manutenção preditiva vem sendo aplicada na busca pela melhoria contínua dos componentes de turbinas eólicas, com o objetivo de reduzir custos e sanar falhas.

Quando os projetos eólicos são desenvolvidos, é feita uma expectativa de que o modelo dure 20 anos e as turbinas eólicas são projetadas para que alcancem ou passem essa expectativa baseadas nas cargas de vento de acordo com as normas que a regem.

De acordo com Alewine (2014),

O foco principal quando os projetos eólicos atuais são desenvolvidos está no preço final e os custos com operação e manutenção são largamente esquecidos. Atualmente, existem centenas de modelos de turbina em operação, as vezes até no mesmo parque eólico, o que faz com que a complexidade aumente quando se vai analisar os modos de falhas e como se preparar para resolvê-los.

A manutenção é um dos requisitos que também deve ser levado em consideração quando se faz um projeto, não somente eólico, mas qualquer um outro. No caso proposto, não é de se esperar que todos os componentes de uma turbina eólica irão permanecer por mais de 20 anos sem precisar de alguma operação de manutenção, reparo e/ou troca de algum componente de tal forma que mantenha o período de vida útil do projeto dentro do esperado.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é mostrar o que se tem feito para sanar os problemas mais recorrentes em componentes de turbinas eólicas, comumente chamadas de aerogeradores. Ainda é objetivo fazer uma breve descrição do cenário em que as energias renováveis se encontram assim como definir alguns conceitos para manutenção industrial.

A fim de se obter êxito nos objetivos especificados, a pesquisa bibliográfica foi utilizada, onde se buscou artigos, revistas científicas, dissertações e teses, de fontes online como o *google* acadêmico e portal de periódicos CAPES, no qual se pode ter acesso a publicações nacionais e internacionais de alto impacto científico.

2. DESENVOLVIMENTO

A utilização de energias renováveis está em crescente ascensão quando comparado com a utilização de fontes não-renováveis, como carvão natural, ou até mesmo a energia proveniente das hidrelétricas, para a geração de eletricidade. A adoção das fontes renováveis pelos países data da década de 1970, quando as crises do petróleo os levaram a procurarem segurança no fornecimento energético e na dependência da importação de energia (SIMAS, 2012, p.24). A partir daí, constantemente tem surgido regulamentações no setor elétrico que favorece a expansão da utilização dessas fontes, com destaque para a energia solar fotovoltaica e a energia eólica.

Em 2012, a ANEEL, através da Resolução Normativa nº 482, estabeleceu as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, além do sistema de compensação de energia elétrica. A partir desta resolução, foi possível os pequenos consumidores começarem a instalar seus próprios sistemas de geração de eletricidade para suprir a demanda de suas próprias residências, por exemplo. Em países desenvolvidos, existem sistemas com esse fim, como sistemas com turbinas eólicas, com painéis fotovoltaicos e até mesmo sistemas hídricos que é composto pelos dois últimos.

A expansão desse mercado tem levado a mídia e os empresários a mostrarem os benefícios da utilização de sistemas que utilizam fontes renováveis, entretanto no desenvolvimento dos projetos, só levam em consideração o tempo de vida que o sistema ficará sem necessitar de manutenção e/ou reparo (vida útil), e pouco se abordam os gastos futuros e necessários com manutenção.

Nunes (2001) comenta que “as falhas em equipamentos podem representar grandes perdas econômicas e humanas, apresentando, em muitos casos, comprometimentos significativos para a imagem institucional das empresas”. Ainda nesse sentido, segundo a empresa Gatec (2016), “dependendo da indústria específica, os custos de manutenção podem representar entre 15% a 30% do custo dos bens produzidos”. Geralmente, as características técnicas são estudadas em cinco aspectos de confiabilidade, requisitos de manutenção, disponibilidade, sustentabilidade e impactos ambientais. No entanto, esses aspectos estão inter-relacionados, por exemplo, a manutenção e a disponibilidade do sistema têm efeitos significativos em sua confiabilidade. Logo se percebe que a manutenção é de grande importância e não se pode deixar de considerá-la quando da viabilidade e aplicação em um projeto.

2.1. A manutenção industrial

A manutenção surgiu a partir da necessidade de redução nos custos. Diversos autores definem o que é a manutenção.

Nunes (2001) afirma que o termo manutenção engloba os conceitos de prevenção (manter) e correção (restabelecer). Já Monchy (1989) apresenta o conceito da Associação Francesa de Normatização, na qual a “manutenção é o conjunto de ações que permitam manter ou restabelecer um bem, dentro de um estado específico ou na medida para assegurar um serviço determinado”.

Segundo Slack et. al. (2008) a literatura enfatiza que o termo manutenção “é usado para abordar a forma pela qual, as organizações tentam evitar as falhas, cuidando de suas instalações físicas”.

De acordo com Moubray (2000), “‘manter’ significa continuar em um estado existente, ou seja, a manutenção é o conjunto de técnicas de atuação para que os ativos físicos (equipamentos, sistemas, instalações) cumpram ou preservem sua função ou funções específicas”.

O alto custo do maquinário e da infraestrutura dos aerogeradores, combinado com a dificuldade de acesso a eles pelo pessoal de manutenção, exige sistemas de manutenção complexos, se for necessário obter alta confiabilidade, disponibilidade, facilidade de manutenção e segurança. Se for detectada uma falha nos rolamentos, por exemplo, o custo de reparação ou renovação poderá ser de 5000 €, mas, se não for detectado, poderá aumentar para mais de 250.000 € devido a danos colaterais de outros componentes (McMillan e Ault, 2008).

Diversas são as técnicas de manutenção utilizadas no dia-a-dia, onde podemos citar a manutenção corretiva, a preventiva, a preditiva ou proativa, a competitiva até a manutenção classe mundial. Nos aerogeradores, a literatura mostra que é grande a aplicação da manutenção preditiva.

Segundo a Gatec (2016), “A manutenção preditiva é uma filosofia ou atitude que usa a condição operacional real do equipamento e sistemas da planta industrial, para otimizar a operação total da planta industrial”.

De acordo com Bandeira, Abreu e Gianelli (2010),

“A manutenção preditiva (do inglês, *predictive maintenance*) é aquela que é realizada a qualquer tempo, visando corrigir uma fragilidade percebida antecipadamente à ocorrência de um problema. Difere da manutenção preventiva por se realizar em virtude da constatação de uma tendência. A manutenção preditiva, após a análise dos fenômenos, adota dois procedimentos para atacar os problemas detectados: Estabelece um diagnóstico e efetua uma análise de tendências.”

A massiva utilização da manutenção preditiva é devido aos vários benefícios que está técnica propicia. A Gatec (2016) menciona que a adoção da manutenção preditiva em detrimento dos outros tipos é o fato de que esta é mais econômica. A mesma cita ainda que se pode obter os seguintes resultados através da aplicação deste tipo de manutenção:

1. Eliminação de desperdício de peças;
2. Diminuição de estoques associados;
3. Aumento da eficiência nos reparos;
4. Aumento da confiabilidade da planta;
5. Diminuição da gravidade dos problemas;
6. Maior disponibilidade das máquinas, (menor perda de tempo).

E como consequência, são obtidos os seguintes resultados:

1. Diminuição dos custos globais;
2. Aumento da confiabilidade;
3. Aumento da produtividade;
4. Melhoria da qualidade.

Dentre as técnicas de manutenção preditiva, a literatura mostra que a análise de vibrações é a técnica mais utilizada devido apresentar o melhor custo/benefício, além de fornecer

dados que ajudam a prolongar a vida dos equipamentos, o que ajuda a sanar os problemas em componentes de aerogeradores.

A Gatec (2016) define tecnicamente a análise de vibrações como o processo pelo qual as falhas em componentes móveis de um equipamento, são descobertas pela taxa de variação das forças dinâmicas geradas. Tais forças afetam o nível de vibração, que pode ser avaliado em pontos acessíveis das máquinas, sem interromper o funcionamento dos equipamentos.

Autores como Borges, Machado e Pinto (2015) conceituam a análise de vibrações da seguinte forma:

“A Manutenção Preditiva por análise de vibrações, está baseada no conhecimento do estado da máquina através de medições periódicas e contínuas de um ou mais parâmetros significativos, evitando paradas inesperadas e substituição desnecessárias de peças. Esta análise é utilizada desde os anos 70 e é um sucesso devido a resultados econômicos obtidos em curto prazo, pela redução de intervenções de manutenção em até 70%.”

2.2 Análise de vibrações em aerogeradores

A indústria de energia eólica desenvolveu melhorias significativas no campo das estratégias de manutenção e reparo de aerogeradores, empregando o monitoramento de condições (MC) integrado nos sistemas de controle de supervisão e aquisição de dados (SCADA). Os algoritmos de detecção e diagnóstico de falhas (ADDF) são usados para fornecer alertas antecipados de defeitos estruturais, mecânicos e elétricos, permitindo que os operadores de parques eólicos realizem manutenção preditiva e, conseqüentemente, reduzam as taxas de falhas (García et al., 2012).

A manutenção preditiva também é usada em conjunto com a manutenção preventiva, sendo ambas muito importantes para os aerogeradores offshore, onde o pessoal de manutenção opera à mercê do clima. Os aerogeradores maiores requerem mais manutenção preventiva do que os menores (Lu et al. 2009).

Na literatura, diversos autores explicam como a manutenção preditiva através da utilização da análise de vibrações vem sendo aplicada, buscando detectar falhas em componentes de aerogeradores, e com o objetivo de evitar paradas não planejadas, reduzindo assim principalmente custos no sistema.

Baseado nisso, a seguir será exposto o que alguns autores desenvolveram nesta área a fim de mostrar os benefícios de se utilizar a manutenção preditiva através da análise de vibrações e quais os benefícios desta técnica para a área de energia solar, com a redução de quebras e defeitos em componentes de aerogeradores.

Almeida (2016), no trabalho intitulado “Análise de falhas em rolamentos por análise de vibração aplicado a aerogeradores”, utiliza-se da aplicação de técnicas preditivas para detecção

de falhas em rolamentos de aerogeradores e utiliza-se análise de vibrações. Na sua dissertação, a energia solar é comentada como uma energia promissora devido ao seu rápido crescimento, o que lhe levou a buscar soluções para problemas em rolamentos em aerogeradores. Almeida utilizou-se da análise de vibrações para detectar e localizar os problemas a fim de evitar acidentes ocasionado por falhas inesperadas e menciona que a baixa rotação do sistema dificulta a detecção destas falhas. Como conclusão do trabalho, o autor menciona que a solução para problemas com rolamentos começa pela indicação de sinais padrões dos defeitos, o que facilita o diagnóstico de possíveis falhas. Essas falhas detectadas são: introdução de grãos de areia no rolamento, desgaste na pista externa do rolamento e oxidação do rolamento. Uma vez identificadas, a manutenção preditiva surge para suprimir esses problemas. E finalmente, processando os dados obtidos na análise de vibrações, são construídos gráficos através dos diferentes picos nas faixas de frequência, do mapeamento dos defeitos.

Similarmente, Sequeira (2012), no trabalho intitulado “A análise de vibrações como ferramenta para a melhoria da manutenção em aerogeradores”, como o próprio título menciona, apresenta a aplicação da técnica de manutenção preditiva, utilizando-se da análise de vibrações para obter melhorias em aerogeradores de parques eólicos, visando otimizar a manutenção dos aerogeradores através da redução das perdas de produção de energia e custos de manutenção. No referido trabalho, a autora buscou identificar as fontes de vibrações que são transmitidas ao sistema e a sua estrutura, para compreender como a fadiga influenciava os componentes mecânicos dos aerogeradores. Percebeu-se que além da análise de vibrações, poderia ser utilizado técnicas como análise de óleo, termografia e endoscopia para se obterem melhoras significativas em aerogeradores. Utilizando-se dessas técnicas, a autora menciona que com o histórico de problemas nos aerogeradores, é possível detectar as falhas no início da ocorrência, conhecendo a sua causa e calculando aproximadamente o tempo restante de vida útil. Concluindo o trabalho, Sequeira fala que a manutenção baseada na análise de vibrações é de grande importância, e que se deve sempre utilizar novos materiais, como lubrificantes e componentes mecânicos.

Chiesa e Bottega (2014), no artigo intitulado “Análise de vibrações induzidas na torre de um aerogerador”, investigaram as vibrações que ocorriam na torre de sustentação de aerogeradores. De acordo com os autores, essas vibrações podem ser provocadas por diversos fatores, no qual se incluem o desbalanceamento das hélices, peças defeituosas, desequilíbrio e ressonância. Nesse trabalho, eles utilizaram-se também de técnicas preditivas, através da análise de vibrações, no qual é possível identificar problemas em aerogeradores, o que facilita o planejamento da manutenção em parques eólicos. Citam ainda as vantagens da análise de vibrações e entre elas citam: diminuição de perdas e custos operacionais provocados por interrupções abruptas devido a quebras em componentes mecânicos dos aerogeradores. Os autores discretizaram a torre de um aerogerador pelo Método dos Elementos Finitos (FEM) e algoritmos, que em seguida foram implementados no software Matlab afim de determinar as frequências naturais, os modos de vibração e a resposta do sistema estudado.

No artigo intitulado “Manutenção preditiva por análise de vibrações”, Blaquez e Barbosa (2014), apresentam um estudo de caso com a aplicação de técnica de manutenção preditiva através da análise de vibrações em um equipamento rotativo com rotor acoplado ao eixo, similar a um aerogerador, onde foi possível detectar um desbalanceamento no rotor. Com a utilização desta técnica preditiva, foi possível aplicar as correções necessárias para evitar danos nos ativos e paradas sem planejamento da produção devido a quebras dos equipamentos. Ainda neste trabalho, os autores comentam que tinham como objetivo apresentar e analisar os benefícios de adotar a manutenção preditiva nas indústrias e que a gestão eficiente do setor de manutenção pode representar um papel estratégico nas organizações, promovendo e sustentando vantagens competitivas no mercado.

Diante do exposto pelos autores anteriormente mencionados, pode-se afirmar que a análise de vibrações, dentre as técnicas de manutenção preditiva é a que mais propicia benefícios buscando melhorias contínuas nos sistemas. Nos sistemas eólicos, atualmente a literatura foca na análise de vibração por tentar detectar em qual componente pode haver uma falha, e essa técnica é eficiente na solução desses problemas.

Assim, a manutenção industrial de aerogeradores é de importância para diversas empresas em todo o mundo. Há estudos voltados para a elucidação de problemas/falhas em diversos países.

Ribrant e Bertling (2007), por exemplo, analisaram falhas de aerogeradores na Suécia, Finlândia e Alemanha. Os dados para a Suécia foram obtidos entre 2000 e 2004 de um número crescente (com uma média de 625 e representando 95% de todas as turbinas) de 500-1500 kW aerogeradores de uma variedade de fabricantes. O número médio de falhas por turbina por ano foi de 0,402, o sistema elétrico, sensores e pás/pitch apresentando proporcionalmente mais falhas e aerogeradores maiores e mais novos (41 MW) apresentaram maiores taxas de falhas. Mais de 72 aerogeradores na Finlândia (aproximadamente 100% deles) foram estudados no mesmo período. A taxa de falha foi de 1,38 por aerogeradores por ano, aparecendo principalmente no sistema hidráulico, nas pás/pitch e nas engrenagens. As falhas estudadas na Alemanha foram coletadas entre 2003 e 2005 de 865 aerogeradores, entre 4% e 7% do total. Aqui a taxa de falha foi de 2,38 por turbina por ano, principalmente decorrente de falhas nos sistemas elétrico, de controle, sensores e hidráulicos. Falhas de sistemas elétricos, de controle e hidráulicos, sensores e lâminas eram comuns nesses países, respondendo por mais de 65% dos totais. As maiores paradas foram encontradas na caixa de câmbio (Suécia e Finlândia), seguidas pelo sistema de controle na Suécia e lâminas / grama na Finlândia. Na Alemanha, os maiores tempos de inatividade ocorreram no gerador, seguidos pela caixa de câmbio.

3. CONCLUSÃO

O interesse em energia renovável vem aumentando desde a primeira crise do petróleo em 1973 e a indústria de energia renovável tem feito avanços significativos desde o protocolo de Kyoto assinado no Japão em 1997, onde as reduções coletivas nas emissões de gases de efeito estufa foram acordadas e vários desenvolvimentos foram encorajados pelos governos ao redor o mundo.

Dentre as diversas fontes de energias renováveis utilizadas em todo o mundo, a energia eólica é uma das mais importantes fontes de energia renovável e que traz muita esperança quando se refere a geração de energia elétrica. Em termos locais, o Brasil é um país que possui grande parte da sua eletricidade a partir de fontes limpas de energia, entretanto sofre por possuir a maior parte da sua geração a partir de hidrelétricas, principalmente porque em períodos de estiagem, quando os reservatórios estão com baixo nível de água, torna-se muito caro utilizar termoelétricas, que utilizam fontes não-renováveis para a produção de eletricidade.

Face a isso, o crescimento dos parques e fazendas eólicas traz inúmeros benefícios para o país, e quanto a sua vida útil, é de interesse que esses sistemas durem muito tempo sem que haja problemas. Embora a vida útil desses sistemas seja em média 20 anos, a manutenção é de grande valia nesse cenário, pois como mencionado pela literatura pode haver uma redução de até 70% nas intervenções nos aerogeradores.

Os defeitos encontrados nas pás das turbinas eólicas, e que é parte do processo de manutenção, são frequentemente um resultado do processo de produção, e eles influenciarão na confiabilidade das pás, dependendo de seu número, tipo, tamanho e localização.

Como técnica de manutenção utilizada, a manutenção preditiva tem sido a mais utilizada de acordo com a literatura, e a análise de vibrações surge com o objetivo de detectar as possíveis falhas que podem ocorrer nos componentes dos aerogeradores. Atualmente estão aparecendo algumas ferramentas computacionais que associadas a manutenção preditiva, chega-se a bons resultados. Assim, tem-se percebido que o objetivo vem sendo alcançado, mas é importante sempre inovar e como sugerido pela literatura apresentada neste trabalho, deve-se utilizar de novos materiais, como lubrificantes e estar sempre acompanhado o desempenho dos equipamentos.

4. REFERÊNCIAS

ABEEOLICA, 2015. **Associação Brasileira de Energia Eólica**. Disponível em: <http://www.abeeolica.org.br/pdf/Boletim-de-Dados-ABEEolica-Julho-2015-Publico.pdf>. Acesso em: 08 de ago. de 2019.

ALEWINE, K. **Wind Turbine Generator Maintenance: What to Expect and Why**. Power, Estados Unidos, v. 158, n. 12, p. 34-43, 2014. Disponível em: <http://www.powermag.com/wind-turbine-generator-maintenance-what-to-expect-and-why/>. Acesso em: 22 de mar. de 2019.

ALMEIDA, I. B. de. **Análise de falhas em rolamentos por análise de vibração aplicado a aerogeradores**. 2016. 78f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Natal. Disponível em: <http://repositorio.ufrn.br:8080/jspui/handle/123456789/21176>. Acesso em: 04 de abr. de 2019.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 04 de abr. de 2019.

ANEEL, 2015. **Agencia Nacional de Energia Elétrica**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/FontesEnergia.asp?>. Acesso em: 07 de ago. de 2019.

BANDEIRA, G.; ABREU, G. de; GIANELLI, R. **Vibração e Ruído em Manutenção Preditiva**. Bauru: Ed. da UNESP, 2010.

BIG. **Banco de Informações de Geração**. Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). 2016. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/FontesEnergia.asp?>. Acesso em: 20 de mar. de 2019.

BORGES, H. S.; MACHADO, I. S.; PINTO, M. V. S. **A aplicação de derivadas na análise de vibrações mecânicas para manutenção preditiva**. In: EVINCI – EVENTO DE INICIAÇÃO CIENTIFICA, 2015, Curitiba. Disponível em: <http://portaldeperiodicos.unibrazil.com.br/index.php/anaisdevinci/article/view/237>. Acesso em: 27 de mar. de 2019.

BLAQUEZ, R.; BARBOSA, J. C. **Manutenção preditiva por análise de vibrações**. In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2015, Ponta Grossa. Disponível em: <http://www.aprepro.org.br/combrep/2015/down.php?id=985&q=1>. Acesso em: 01 de mai. de 2019.

CHIESA, D.; BOTEGGA, V. **Análise de vibrações induzidas na torre de um aerogerador**. In: XX EREMAT - Encontro Regional de Estudantes de Matemática da Região Sul, 2014, Bagé. Bagé: XX EREMAT - Encontro Regional de Estudantes de Matemática da Região Sul, 2014. p. 25-45. Disponível em: https://eventos.unipampa.edu.br/eremat/files/2014/12/CC_CHIESA_00357764048.pdf. Acesso em: 05 de mai. de 2019.

GATEC. Gestão agroindustrial. **Projeto Manutenção Preditiva Análise de vibrações**. Disponível em: http://paginapessoal.utfpr.edu.br/jmario/manutencao-mecanica/artigos/vibracoes.pdf/at_download/file. Acesso em: 02 de mai. de 2019.

GARCÍA, F. P.; TOBIAS, A. M.; PINAR, J. M.; PAPAELIAS, M. **Condition monitoring of wind turbines: techniques and methods**. *Renewable Energy*, v. 46, p. 169-178, 2012.

GONZÁLEZ, M. O. A.; GONÇALVES, J. S.; VASCONCELOS, R. M. **Sustainable development: Case study in the implementation of renewable energy in Brazil**. *Journal of Cleaner Production*, v. 142, p. 461-475, 2017.

LI, M.; LI, X. **MEP-type distribution function: a better alternativa to Weibull function for wind speed distributions**. *Renewable Energy*, v.30, p.1221-1240, 2005. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148104004033>. Acesso em: 29 de mar. de 2019.

LU, B.; LI, Y.; WU, X.; ZHONGZHOU, Y. **A review of recent advances in wind turbine condition monitoring and fault diagnosis**. Em: proceedings of IEEE power electronics and machines in wind applications, PEMWA, p. 1-7, 2009.

MCMILLAN, D.; AULT, G. W. **Condition monitoring benefit for onshore wind turbines: sensitivity to operational parameters**. Renewable Power Generation, IET, v. 2(1), p. 60-72, 2008.

MONCHY, F. **A função manutenção**. São Paulo: EBRAS/DURBAN, 1989.

MOUBRAY, J. **RCM II: manutenção centrada em confiabilidade**. Grã Bretanha: Biddles Ltd., Guilford and King's Lynn, 2000. Edição Brasileira.

NUNES, E. L. **Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC): Análise da implantação em uma sistemática de manutenção preventiva consolidada**. 2001. 146f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/82056>. Acesso em: 05 de mai. de 2019.

PAO, H. T.; FU, H. C. **The casual relationship between energy resources and economic growth in Brazil**. Energy Policy, v. 61, p. 793-801, 2013.

RIBRANT, J.; BERTLING, L. M. **Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997–2005**. IEEE transactions on Energy Conversion, v. 22, p. 167-73, 2007.

SEQUEIRA, C. D. **A análise de vibrações como ferramenta para a melhoria da manutenção em aerogeradores**. 2012. 183f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/9961/1/Sequeira_2012.pdf. Acesso em: 06 de mai. de 2019.

SIMAS, M. S. **Energia eólica e desenvolvimento sustentável no Brasil: estimativa da geração de empregos por meio de uma matriz insumo-produto ampliada**. 2012. 219f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-10092012-095724/en.php>. Acesso em: 08 de mai. de 2019.

SLACK, S. C.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

VIEIRA, F. V., VERÍSSIMO, M. P. **Crescimento econômico em economias emergentes selecionadas: Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul (BRIC)**. Economia e Sociedade, v. 18(3), p. 513-546, 2009.

Capítulo 03

PROJETO MECÂNICO DE UM SISTEMA AUTÔNOMO HÍBRIDO DE BATERIA PV-EÓLICO-DIESEL-BATERIA PARA UM RESTAURANTE NO BRASIL

MECHANICAL DESIGN OF A STANDALONE PV-WIND-DIESEL-BATTERY HYBRID SYSTEM FOR A RESTAURANT IN BRAZIL

WÊNIO FHARÁ ALENCAR BORGES¹, ANDRÉ SALES AGUIAR FURTADO², FILIPI MACIEL DE MELO³, IGOR ANTONIO DE OLIVEIRA CARVALHO⁴

ABSTRACT

This paper presents a feasible study to determine the best configuration of a standalone hybrid renewable energy system (HRES) for the University Restaurant (RU) of the Federal University of Pernambuco (UFPE). The proposed work utilizes a hybrid solar-wind system with diesel generator and/or battery backup. The solar radiation and wind data were obtained from NASA surface meteorology and solar energy database. The Hybrid Optimization Model for Electric Renewable (HOMER) software was used to do the simulations and techno-economic evaluation. Many different cases have been carried out to find the optimal configuration based on the net present cost (NPC) and cost of electricity (COE). Results indicated that a system with PV panel, diesel generator, and battery is the most economically viable option. However, the second option was selected, since it is more environmentally correct, with a renewable fraction of 54% of power production, and 16.3% of excess of electricity. The system contains PV panels, wind turbines, diesel generator and a battery bank for backup. It is also economically viable with the NPC of \$1,173,037 and a COE of \$0.5/kWh. In addition, the result shows that this system reduces the emission of pollutants such as CO₂ when compared with the system without wind turbines.

keywords: Sistema fotovoltaico, residência, áreas isoladas.

1. INTRODUCTION

In recent years, global warming which is caused by emissions of greenhouse gases along with other air pollutants has become a significant concern for humanity (FAZELPOUR et al., 2014). Due to these environmental concerns, implementing sustainable energy strategies is one of the most important aspects for a sustainable world (AKYUZ et al., 2011). With the increasing knowledge in new sources of energy supply, many people and companies around the world have seen the usage of renewable energies as something friendly and environmentally correct. Recent

¹Mestre em Engenharia Mecânica (UFPE), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Pedreiras, Pedreiras-MA.

E-mail: wenio.borges@ifma.edu.br

²Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais (UFPI), Universidade Federal do Piauí – UFPI, Teresina-PI.

E-mail: salesandre7@gmail.com

³Mestre em Engenharia Mecânica (UFPB), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Timon, Timon-MA.

E-mail: filipi.melo@ifma.edu.br

⁴Mestre em Engenharia de Materiais (IFPI), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Timon, Timon-MA.

E-mail: igor.carvalho@ifma.edu.br

developments in renewable generation technologies allows the use of natural resources (wind, hydro, or photovoltaic (PV)) as alternative energy sources, but their intermittency typically results in inadequate energy supply for a substantial proportion of the year (GAN et al. 2015). The lack of solar energy during the night and the lack of wind energy for a few hours during the day makes hybrid configurations more attractive for electricity supplies, which rely on renewable energy sources (BENTOUBA and BOUROUIS, 2016). HES (hybrid energy systems) are becoming energy systems of choice for stand-alone applications due to ever increasing fuel costs and global concern on GHG (Green House Gas) emissions (PERERA et al., 2015). In addition, choosing this type of systems usually implies lower costs and demonstrates higher reliability than photovoltaic (PV) or wind systems. The most commonly used systems are PV–Wind–Battery and PV–Diesel–Battery (BERNAL-AGUSTÍN and DUFO-LÓPEZ, 2009). Therefore, the combination of one source of energy generation with a different one overcomes the weakness of each source working individually due to their intermittency during the seasons of the year.

Researchers have been using softwares to find the best combination of HES. In order to develop a HES model to identify the economic configuration of PV and Wind energy with Diesel generation and batteries' banks, the Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER) has been used (SANDEEP and VAKULA, 2016). HOMER is a tool developed by National Renewable Energy Laboratory, USA, in 1992, which is the most used tool for the system optimization by the researchers (KHAN and IQBA, 2005; BEKELE and PALM, 2010; BERNAL-AGUSTÍN, DUFO-LÓPEZ, and RIVAS-ASCASO, 2006). It is an optimization software package, which can handle different technologies (including PV, wind, hydro, fuel cells, and boilers) and evaluate design options for both off-grid and grid-connected power systems for remote, stand-alone, and diesel generation applications (MAMAGHANI et al., 2016). The program simulates the operation of thousands of different system designs, with and without a backup generator. It is then able to identify the least cost system as a function of load size and other variables (LILIENTHAL and GIVLER, 2014). HOMER models the physical behavior of the power system and its life-cycle cost, which is the total cost of installing and operating the system over its life span. The variable, which HOMER uses to represent the life-cycle cost of the system, is the total net present cost (NPC). This single value includes all costs and revenues that occur within the project lifetime, with future cash flows discounted to the present. The total net present cost includes the initial capital cost of the system components, the cost of any component replacements that occur within the project lifetime, the cost of maintenance and fuel, and the cost of purchasing power from the grid (LAMBERT et al., 2006).

In this paper, we are interested in determining the feasibility of implementing a stand-alone renewable energy system for the University Restaurant (RU) of the Federal University of Pernambuco (UFPE). The optimization of a RES with different scenarios was considered, which includes the utilization of photovoltaic panels, wind turbine, generator, and battery. The main objective is to obtain a deeply understanding in the application of renewable energy resources in governmental/public buildings. During the investigation, solar and wind data were collected from

NASA, and a load model for the restaurant was created based on in the historical consumption and list of equipment utilized. To obtain the optimum configuration, HOMER is used to simulate and find the best option with low cost to implement, based on the net present cost (NPC) and the cost of electricity (COE).

2. METHODOLOGY

2.1. Location and description

The University Restaurant of the Federal University of Pernambuco was selected in this study. As shown in Fig. 1, its geographical location is $8^{\circ}03'03.6''S$ $34^{\circ}57'10.8''W$. This restaurant was established in 2011 with an area of 1,292 m², and it has a capacity of serving up to 550-seated people. Daily, from Monday to Friday, meals are served in the breakfast (up to 500), lunch (up to 3,000), and dinner (up to 1,500) (UFPE, 2020; SANTOS et al., 2015).

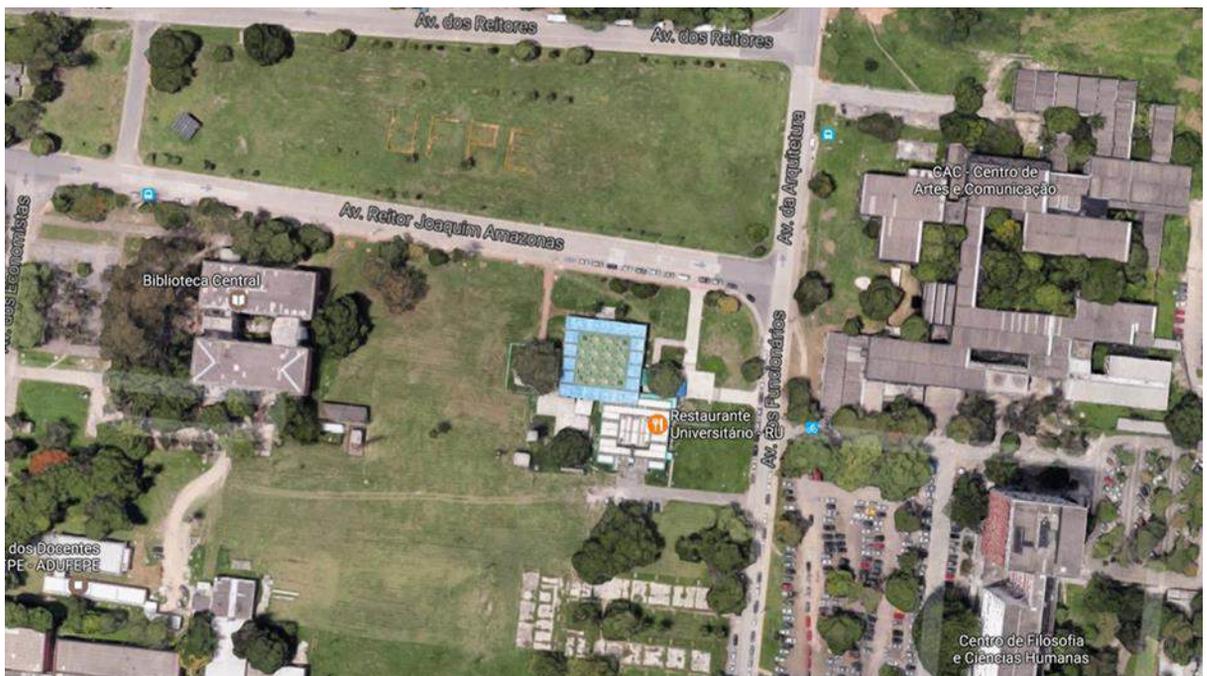


Figure 1. Geographical location - University Restaurant (RU).

Source: Author, 2020.

2.2. Electrical load

Although there is equipment that requires a certain thermal demand, the main equipment at the University Restaurant requires electrical demand. A private company called CELPE (Energy Company of Pernambuco) provides electricity for the entire university as well as for the restaurant. Electrical appliances and their parameters were obtained based on data collected by interviews on the site as it is shown in Table 1. These equipments consume the major part of the electrical load, with an additional consumption of some small equipment like electric mixer (1 unit) and blender (3 units). It is important to mention that the cold rooms and the air conditioning work 24 hours, 7 days a week, in such way that it keeps the perishable foods like meats, well preserved.

Table 1

Appliances used in RU.

| Appliances | Quantity (unit) |
|------------------|-----------------|
| Lamp | 154 |
| Air conditioning | 4 |
| Desktop computer | 8 |
| Cold room | 5 |
| Mixer | 1 |
| Blender | 3 |

Based on the list of equipment shown in the above table and on the historical consumption, Table 2, the load profile for one year was obtained as one can see in the Fig. 2. RU has an electrical load, which varies monthly, with more important variations especially at the beginning, the middle, and the end of the year, for some reasons. At the beginning of the semesters (Jan-Feb, Aug-Sep), the university receives new students (freshman) and they want to have the experience of having meals in this place. At the end of the semesters (Jun-Jul, Nov-Dec), most of the students have tests, so they stay in the university during the entire day. Therefore, the consumption once again increases more than the usual.

Table 2

Historical consumption of a year - University Restaurant (RU).

| Month | Electrical consumption | |
|--------|------------------------|--------|
| | kWh/mo. | kWh/d |
| Jul/15 | 19,283.15 | 622.04 |
| Aug/15 | 17,266.51 | 556.98 |
| Sep/15 | 16,013.50 | 533.78 |
| Oct/15 | 20,129.30 | 649.33 |
| Nov/15 | 21,264.14 | 708.80 |
| Dec/15 | 20,812.50 | 671.37 |
| Jan/16 | 13,739.30 | 443.20 |
| Feb/16 | 15,262.80 | 545.10 |
| Mar/16 | 16,350.23 | 527.43 |
| Apr/16 | 18,374.36 | 612.48 |
| May/16 | 19,415.07 | 626.29 |
| Jun/16 | 19,947.01 | 664.90 |

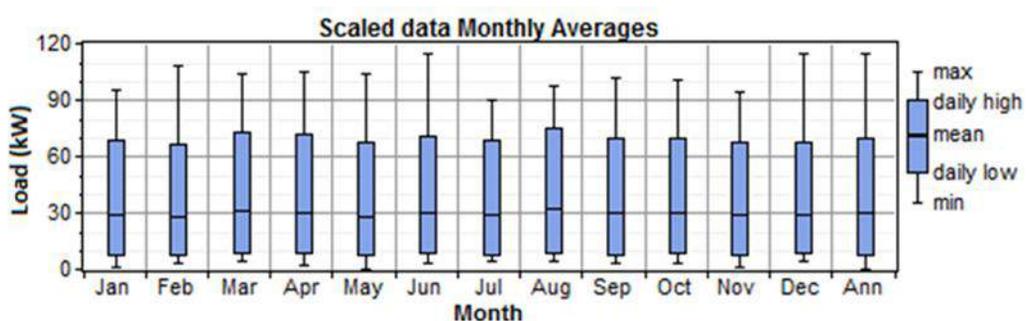


Figure 2. Load profile for one year - University Restaurant (RU).

Source: Author, 2020.

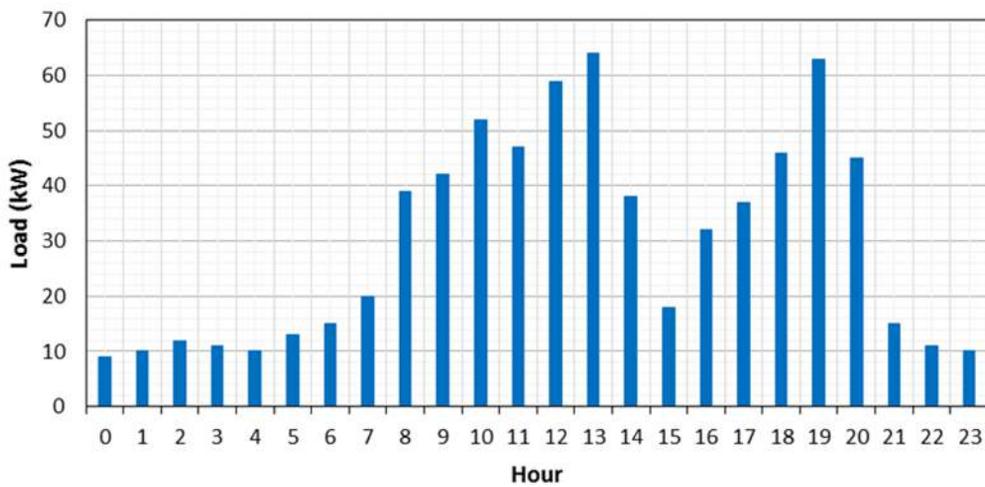


Figure 3. Hourly load data during a year - University Restaurant (RU).

Source: Author, 2020.

2.3. Energy sources

Although there is considerable information about solar and wind data for Pernambuco, which is the state where the city of Recife and the university restaurant are located, studies that shows specific values for the location of the restaurant have not been conducted yet. Therefore, the following sub-sections presents in details how these data was collected.

2.3.1. Solar and wind resource assessment

The raw solar resource data input to the HOMER software are the monthly average global horizontal radiation obtained from Atmospheric Science Data Center (ASDC)-NASA surface meteorology and solar energy database for the restaurant location (NASA/SSE, 2016). The data are obtained online by entering the latitude ($8^{\circ}03'S$) and longitude ($34^{\circ}57'W$), where the restaurant is located. Fig. 4 illustrates Recife's monthly average of two solar parameters (daily radiation and clearness index), which presents the good availability of solar energy throughout the year. The annual average solar radiation for the site where the restaurant is located is $5.89 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$. This value confirms how this place qualifies as a producer of energy.

$$E = A \times r \times H \times PR \quad (1)$$

where, E = Energy (kWh), A = Total Solar panel area (m^2), r = Solar panel yield (%), H = Annual average solar radiation on tilted panels (shadings not included) and PR = Performance ratio, coefficient for losses.

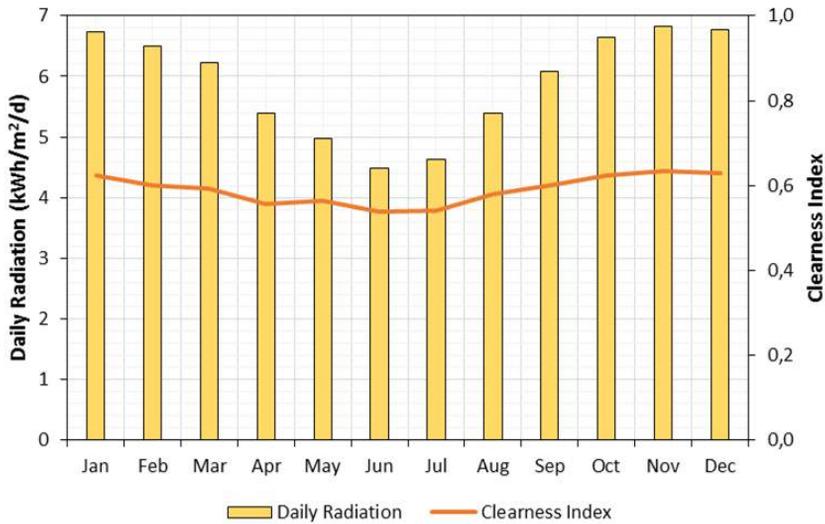


Figure 4. Averaged solar irradiance for Recife.

Source: Author, 2020.

The maximum power from a solar panel can be calculated as (SHEZAN et al., 2016; HOSSAINA et al., 2017):

$$P_{mp} = \eta_{PV} \times G_{\beta} \times A \tag{2}$$

where, A is the surface area of a PV module, Pmp is the maximum power from a solar panel, η_{PV} is the efficiency of silicon based PV cell and G_{β} is the global horizontal solar irradiance.

Similarly to the data obtained for solar resource, the data for wind resource were obtained from the NASA surface Meteorology and Solar Energy website (NASA/SSE, 2016). The data are collected at 10m height, and the 10 year averaged annual wind speed for the latitude and longitude of the restaurant is 4.15 m/s. This value has a poor resolution probably due to the vegetation and buildings near the restaurant. Fig. 5 illustrates the monthly averaged wind speed at the specific location. As said before, the wind speed is measured at 10m height. From the figure, the months of September and October have the maximum measured wind speed of 4.5 m/s, and the lowest value is measured in March, which is 3.51 m/s.

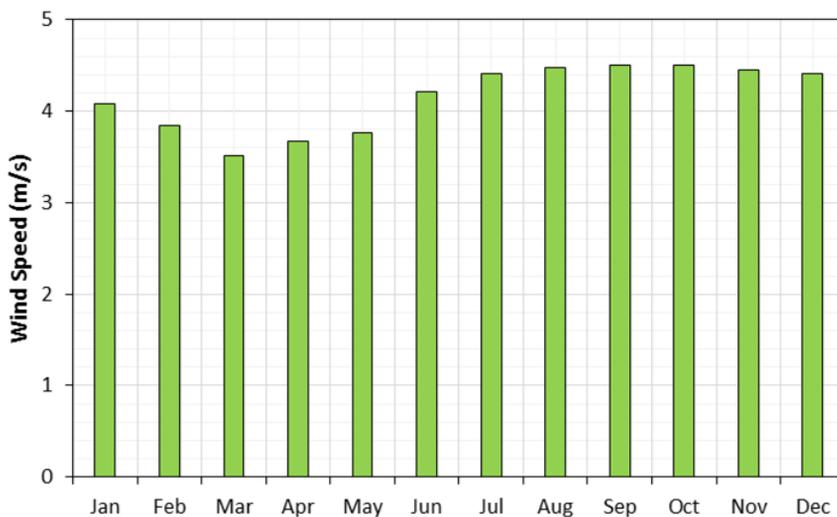


Figure 5. Monthly averaged wind speed at Recife.

Source: Author, 2020.

2.4. Economic model

The economic model for HOMER simulation is developed using the net present cost (NPC) which is the total cost of installing and operating the system over its lifetime. HOMER models each individual system by performing an hourly time-step simulation for one year (HOSSAINA et al., 2017; SINHA and CHANDEL, 2015). In addition, economic analysis is very essential to suggest an optimal combination of components in the HRES. The total NPC of a system is calculated by (RAMLI et al., 2016):

$$C_{NPC, tot} = \frac{C_{ann, tot}}{CRF(i, R_{proj})} \quad (3)$$

where, $C_{ann, tot}$ is the total annualized cost (\$/year), i is the annual real interest rate (%), R_{proj} is the project lifetime (year), CRF represents capital recovery factor. CRF is a ratio given by:

$$CRF(i, N) = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (4)$$

where, N and i are number of years and annual real interest rate respectively.

HOMER uses an annual real interest rate rather than a nominal interest rate in computations (HOSSAINA et al., 2017). The annual real interest rate can be obtained from the nominal rate by using (SHEZAN et al., 2016):

$$i = \frac{i' - f}{1 + f} \quad (5)$$

where i is the annual real interest rate, i' is the annual nominal interest rate, and f is the annual inflation rate.

The average cost per kWh of electricity is called cost of energy (COE). The COE is calculated by dividing total annualized cost by annual electricity supplied to the load which is defined as follows (SINHA and CHANDEL, 2015; RAMLI et al., 2016):

$$COE = \frac{C_{ann, tot}}{E_{served}} \quad (6)$$

CO₂ emissions from the HRES can be calculated according to the following equation (SINHA and CHANDEL, 2015):

$$tCO_2 = 3.667 \times m_f \times HV_f \times CEF_f \times X_c \quad (7)$$

where tCO_2 is the amount of CO₂ emissions, m_f is the fuel quantity (liter), HV_f is the fuel heating value (MJ/L), CEF_f is the carbon emission factor (ton-carbon/TJ) and X_c is the oxidized carbon

fraction. An important information according to Sinha and Chandel (2015) is that in 3.667g of CO₂ there is 1g of carbon.

2.5. Hybrid System Components

The main system components chosen in this study have been selected based on research in the literature, the availability of products and their prices for the Brazilian market. The criteria used to select those components were the cost of investment, replacement, operation & maintenance (O&M), and lifetime. Additional information about the components used in HOMER are shown in Table 3.

Table 3

The input data of the various components in HOMER (HOSSAINA et al., 2017; RAMLI et al., 2016):

| | Cost of investment | Cost of replacement | Cost of O&M | Lifetime |
|--------------|--------------------|---------------------|---------------|----------|
| PV array | \$ 2000/kW | \$ 1200/kW | \$ 30/kW/yr | 30 yr |
| Wind turbine | \$ 3000/kW | \$ 1500/kW | \$ 40/kW/yr | 20 yr |
| Generator | \$ 220/kW | \$ 200/kW | \$ 0.03/h | 15000 h |
| Inverter | \$ 400/kW | \$ 375/kW | \$ 20/kW/yr | 30 yr |
| Battery | \$ 1200/unit | \$ 1200/unit | \$ 60/unit/yr | 12 yr |

2.5.1. PV modules

Photovoltaic modules produces direct current electricity directly from solar sources and they can charge batteries of 12V. To this work, were selected PV panels from Canadian Solar, which has its PV models certified by the Brazilian accreditation agencies. The model Canadian Solar's Quartech CS6P-265P has a rated power of 265W and 16.47% of efficiency based on stand test condition (STC).

In this study, it was assumed an investment cost of \$2/Wp (including PV panel and installation costs). The cost of replacement and O&M were of \$1.2/Wp and \$0.03/Wp, respectively (Table 3) (RAMLI et al., 2016). A derating factor of 80% was employed in this study (LAMBERT et al., 2006). The lifetime of the PV modules was estimated to be 30 years and no tracking system was used.

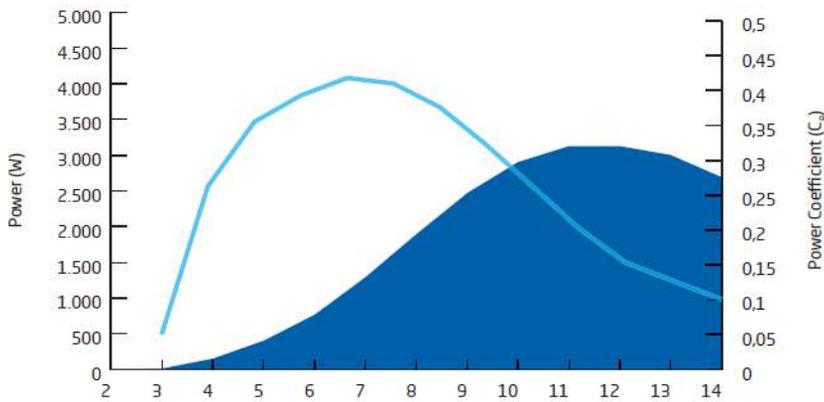


Figure 6. Power and power coefficient - average wind speed at a height of 12m (m/s).

Source: Author, 2020.

2.5.2. Wind Turbine

Unlike windmills, which are used directly to produce work such as water pumping or grain grinding, wind turbines are used to convert wind energy to electricity (TONG, 2016). The wind turbine selected in this simulation is obtained from the Ennera Energy and Mobility S.L, a company established in Spain. The Windera S model is a 3 blade, horizontal axis with a rated capacity of 3.2 kW (ENERA, 2010). Fig. 6 shows the power coefficient and the wind turbine power curve, which has the cut-in and cut-out wind speed of 3 m/s and 25 m/s, respectively. The costs associated with investment (all parts of the wind turbine and installation), replacement, O&M were considered as \$3/Wp, \$1.5/Wp, and \$0.04/Wp respectively (Table 3) (RAMLI et al., 2016). Manufacturer estimates the lifetime of 20 years for the wind turbine.

2.5.3. Diesel generator

Diesel generators have been widely employed along with renewable sources in RES to increase the reliability of such systems (MAMAGHANI et al., 2016). A diesel generator, model Cummins, is used in this study. The initial capital cost of the generator was assumed to be \$220/kW, and the replacement cost and O&M are \$200/kW and \$0.03/h respectively (Table 3). The cost of diesel per liter is assumed to be \$0.8. The operating lifetime of the generator was considered to be 15,000 h, and it has a minimum load ratio of 25% (HOSSAINA et al., 2017).

2.5.4. Batteries

To this study, it was selected a L16P Trojan Battery (TROJAN, 2020). HOMER has this model, which become easier to work with, and which is found in the market. The capital cost and replacement for Trojan L16P is \$1200/unit, and the cost of O&M is \$60/unit/yr (Table 3) (RAMLI et al., 2016).

2.5.5. Inverters

A converter is a device that converts electric power from DC to AC in a process called inversion (Lambert et al., 2006). The inverter is one of the key components of the system as it converts the DC electricity produced by the PV modules into AC electricity (wind turbines are not considered since they already have the inverter included in the capital cost and the diesel generator produces AC voltage) (MAMAGHANI et al., 2016). The inverter used in this work was selected from Enera (2020), with the capital cost of \$400/kW, the replacement cost of \$375/kW, and the cost of O&M of \$20/kW/yr. The lifetime was assumed to be 30 years (Table 3).

2.6. HOMER model design

The general scenario of the hybrid renewable energy system was firstly designed with photovoltaic panels, wind turbine, diesel generator, battery, converter and an AC load profile as shown in Fig. 7. The hourly load data of one year based on the historical consumption, the monthly average wind speed and the solar irradiance are the input data to HOMER. The project lifetime is assumed to be 25 years and the annual interest rate is taken as 10% with an inflation rate of 2%. All this data was presented previously. The values attributed in HOMER need to be in US dollar, then, those values in Table 3 are consistent with the Brazilian market and the literature.

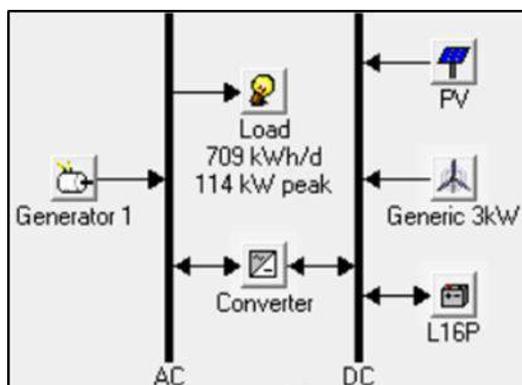


Figure 7. Schematic diagram of the proposed system.

Source: Author, 2020.

Table 4

Equipment's sizes considered in the optimization.

| | |
|----------------------|--------------------|
| PV array (kW) | 0-120 (step of 10) |
| Wind Tur. 3kW (unit) | 0-24 (step of 2) |
| Generator (kW) | 0-100 (step of 20) |
| Battery L16P (unit) | 0-84 (step of 12) |
| Converter (kW) | 0-84 (step of 12) |

To optimize each combination, HOMER sets all possible system configurations based on the data attributed by the user, specifying the range that each component can vary, and then, it

simulates the best configuration by the net present cost. The user can add or remove these values in an appropriate window. For this simulation, Table 4 presents the sizes of equipment considered in the optimization.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Optimization results

According to the HOMER software, 64896 simulations were run with different configurations. Based on the net present cost (NPC), the software found eight best configuration, changing the utilized equipment and its quantities. Fig. 8 shows the optimization results in the categorized form, which includes the best optimal system configurations, from lowest NPC to highest NPC.

| | PV (kW) | G3 | Label (kW) | L16P | Conv. (kW) | Initial Capital | Operating Cost (\$/yr) | Total NPC | COE (\$/kWh) | Ren. Frac. | Diesel (L) | Label (hrs) |
|--|---------|----|------------|------|------------|-----------------|------------------------|--------------|--------------|------------|------------|-------------|
| | 100 | | 60 | 48 | 72 | \$ 299,600 | 82,246 | \$ 1,046,152 | 0.445 | 0.53 | 66,729 | 5,803 |
| | 100 | 2 | 60 | 48 | 72 | \$ 419,600 | 83,005 | \$ 1,173,037 | 0.500 | 0.54 | 64,888 | 5,649 |
| | | | 80 | 36 | 24 | \$ 70,400 | 136,454 | \$ 1,309,001 | 0.557 | 0.00 | 123,631 | 7,905 |
| | | 2 | 80 | 36 | 24 | \$ 190,400 | 137,135 | \$ 1,435,176 | 0.611 | 0.02 | 121,230 | 7,774 |
| | | | 100 | | | \$ 22,000 | 160,938 | \$ 1,482,838 | 0.631 | 0.00 | 154,469 | 8,760 |
| | 120 | | 100 | | 72 | \$ 290,800 | 131,789 | \$ 1,487,056 | 0.633 | 0.46 | 119,501 | 7,261 |
| | 120 | 2 | 100 | | 72 | \$ 410,800 | 133,174 | \$ 1,619,621 | 0.690 | 0.47 | 118,752 | 7,229 |
| | | 2 | 100 | | 6 | \$ 144,400 | 162,630 | \$ 1,620,602 | 0.690 | 0.02 | 153,719 | 8,759 |

Figure 8. Optimization results in the categorized form for the proposed system.

Source: Author, 2020.

From the simulation, as one can see in the above figure, the optimal solution based on the NPC is compound by 100kW PV panel, 60kW diesel generator, 48 batteries and 72kW converter. In this first case, the NPC of the system is \$ 1,046,152; in addition, the COE is \$ 0.445/kWh with a renewable fraction of 53%. The generator needs 66,729 liters per year of fuel consumption, and this can be a disadvantage when the environmental concern is considered.

Fig. 9 shows the cash flow summary, where the diesel generator (label) presents the highest cost of \$ 630,489 while the converter has the lowest cost of \$ 47,504. The reason is the high consumption of diesel, corresponding to \$ 484,563, which is 76.86% of all the cost associated with the generator.

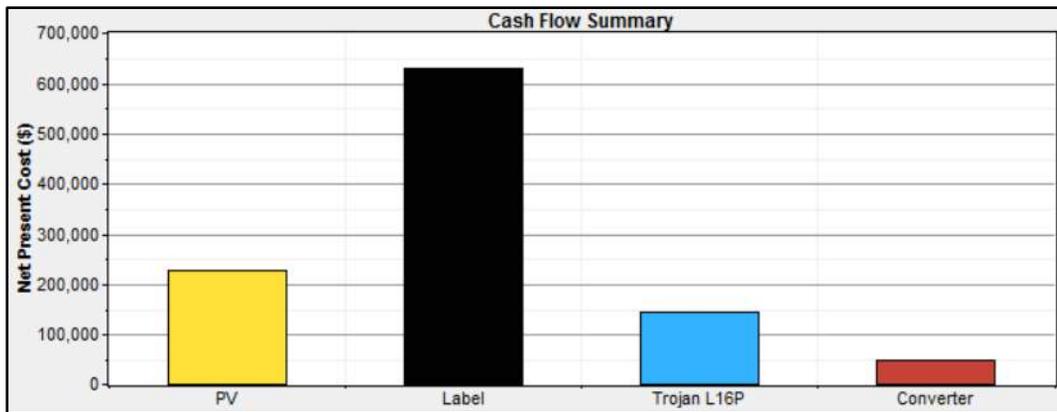


Figure 9. Cash flow breakdown by components for the 1st case.

Source: Author, 2020.

Fig. 10 illustrates the monthly average electric production for the first case. In this case, the PV array provides 53% of electricity, which is 171,876 kWh/yr, and the generator provides the complement of 47%, that is 155,492 kWh/yr. The total annual production of electricity is equal to 327,369 kWh. The annual consumption of AC primary load is equivalent to 258,715 kWh/yr. At the end of the year, this configuration produces 52,589 kWh in excess of electricity, which represents 16.1%.

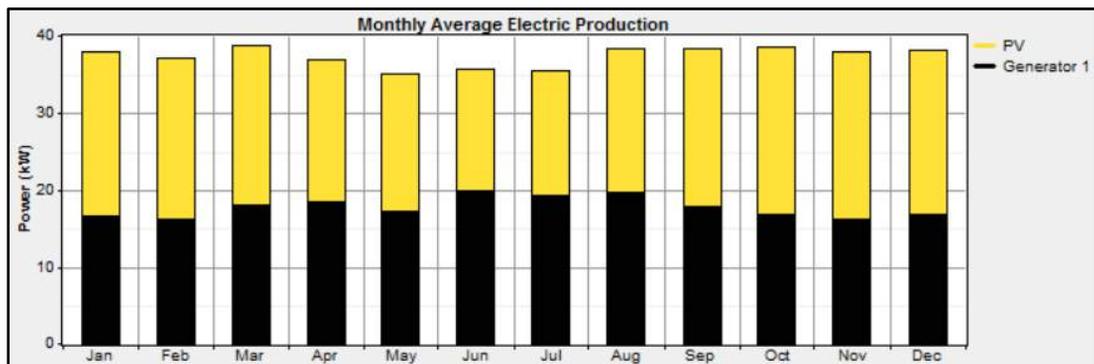


Figure 10. Monthly power production from different sources for the 1st case.

Source: Author, 2020.

The second case differs from the first case due to the addition of wind turbines. The configuration in this second case is compound by 100kW PV panels, 2 wind turbines, 60kW diesel generator, 48 batteries and 72kW converter.

From Fig. 8, the NPC for this second case is equal to \$ 1,173,037, an increase of \$ 126,885 when compared to the first case. This is because of the high initial cost of \$ 419,600. The levelized cost of electricity (COE) and the operating cost are little bit more expensive, with \$ 0.5/kWh and \$ 83,005/yr respectively. However, this system has a renewable fraction of 54%, which is bigger than the renewable fraction of the first case. Additionally, the fuel consumption is lower for this case, with the annual consumption of 64,888 liters.

For the second optimized system, the cash flow summary, where the diesel generator (label) still presents the highest cost of \$ 613,442 and the converter still has the lowest cost of \$

47,504, which is the same of the first case. The reason is still due to the high consumption of diesel, corresponding to \$ 471,196, which is 76.81% of all the cost associated with the generator.

The advantage of the second case is the increasing in the renewable energy percentage. Fig. 10 illustrates the monthly average electric production for the second case. The PV array and the wind turbines produces 171,876 kWh/yr (52%) and 5,787kWh/yr (2%) respectively. This represents a production of 54% of renewable energy. The diesel generator produces 151,085 kWh/yr of electricity. Then, the total annual electricity production is equal to 328,749 kWh/yr. The annual consumption of AC primary load is equivalent to 258,716 kWh/yr, which is the same for both cases. At the end of the year, this configuration produces 53,707 kWh in excess of electricity, which represents 16.3% and it is a bit more than in the first case.

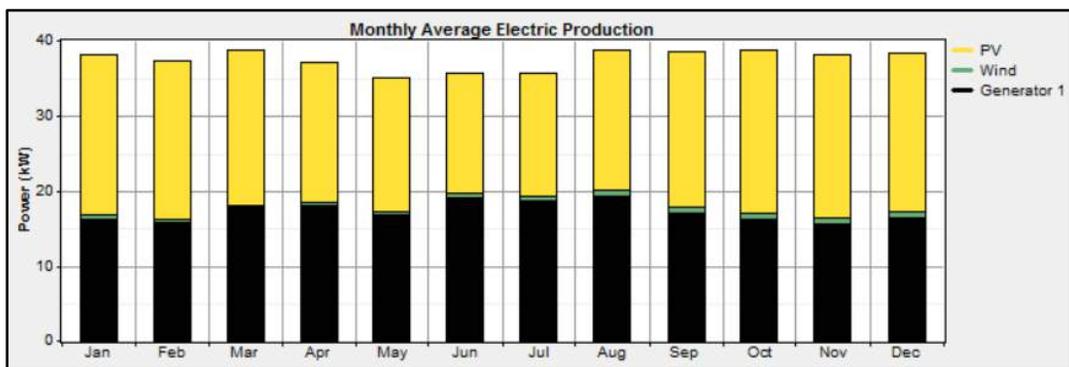


Figure 11. Monthly power production from different sources for the 2nd case.

Source: Author, 2020.

Table 5 shows the amount of harmful emissions including CO₂, CO, unburned hydrocarbon (UHC), particulate matter (PM), sulfur dioxide (SO₂) and nitrogen oxides (NO) for the first and second optimized system. The CO₂ is the biggest pollutant, with 175,720 kg/yr and 170,873 kg/yr of emissions for the first and second system respectively, while the lowest emissions is due to PM, which represents the amount of 32.7 and 31.8 kg/yr respectively.

Table 5

Harmful emissions

| System | Emissions (kg/yr) | | | | | |
|----------------------|-------------------|-----|------|------|-----------------|-------|
| | CO ₂ | CO | UHC | PM | SO ₂ | NO |
| 1 st case | 175,720 | 434 | 48 | 32.7 | 353 | 3,870 |
| 2 nd case | 170,873 | 422 | 46.7 | 31.8 | 343 | 3,764 |

4. CONCLUSIONS

In this paper, an optimization study for the University restaurant (RU) of the Federal University of Pernambuco (UFPE) was conducted to include renewable energy in the actual system. The combination of sources such as solar and wind energy, with diesel generator and

battery storage in a standalone system can supply the energy needs to the restaurant without using electricity of private companies. The results obtained by HOMER showed that the best option comprises 100kW PV array, 60kW diesel generator, 48 batteries and a 72kW converter. In this case, 53% of the load is covered by the PV array while the generator covers 47%. However, the best choice is the second option, since it comprises 100kW PV panels, 2 wind turbines, 60kW diesel generator, 48 batteries and a 72kW converter. In this case, there is a reduction in fuel consumption due to the addition of the wind turbines, which contributes with the production of electricity and the reduction of pollutant emissions.

The proposed system showed by the results presents a cost-effective solution to add a renewable source of electricity for the restaurant. This system has a NPC of \$ 1,173,037 and a cost of electricity of \$ 0.5/kWh. The operating cost is \$ 83,005/yr. The energy produced is enough to supply the needs and generates an excess of 16.3%, which is within the security range. In addition, in this case, 54% of the electricity is provided by renewable sources, where 52% of the load is from the PV array and 2% from the 2 wind turbines. It is important to mention that in the second case the emission of CO₂ is less than in the first case as well as the emission of other pollutants. Then, it is expected that in the future, the rapid development in technologies increase, as well the reduction of taxes by governments for products related with production of renewable energy. Soon, the usage of generators could be reduced by the penetration of renewable products such as photovoltaic panels and wind turbines.

5. REFERÊNCIAS

- Akyuz, E.; Oktay, Z.; Dincer, I. **Energetic, environmental and economic aspects of a hybrid renewable energy system: a case study**. International Journal of Low-Carbon Technologies, 6, 44-54, 2011.
- Bekele, G.; Palm, B. **Feasibility study for a standalone solar wind- based hybrid energy system for application in Ethiopia**. Applied Energy; 87 (2):487-95, 2010.
- Bentouba, S.; Bourouis, M. **Feasibility study of a wind–photovoltaic hybrid power generation system for a remote area in the extreme south of Algeria**. Applied Thermal Engineering 99, 713–719, 2016.
- Bernal-Agustín, J. L.; Dufo-López, R. **Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, 2111-2118, 2009.
- Bernal-Agustín, J. L.; Dufo-López, R.; Rivas-Ascaso, D. M. **Design of isolated hybrid systems minimizing costs and pollutant emissions**. Renewable Energy; 31(14):2227-44, 2006.
- Enera Energy and Mobility S.L. 2020. **Datasheet**. Obtained from <http://www.ennera.com/img/pdf/Product-sheet.pdf>.
- Fazelpour, F.; Soltani, N.; Rosen, M. A. **Feasibility of satisfying electrical energy needs with hybrid systems for a medium-size hotel on Kish Island, Iran**. Energy 73, 856-865, 2014.
- Gan, L. K.; Shek, J. K.H.; Mueller, M. A. **Hybrid wind–photovoltaic–diesel–battery system sizing tool development using empirical approach, life-cycle cost and performance analysis: A case study in Scotland**. Energy Conversion and Management 106, 479-494, 2015.

Hossaina, M.; Mekhilefa, S.; Olatomiwa, L. **Performance evaluation of a stand-alone PV-wind-diesel-battery hybrid system feasible for a large resort center in South China Sea, Malaysia.** *Sustainable Cities and Society* 28, 358-366, 2017.

Khan, M.J.; Iqba, M.T. **Pre-feasibility study of stand-alone hybrid energy systems for applications in Newfoundland.** *Renewable Energy*; 30 (6):835-54, 2005.

Lambert, T.; Gilman, P.; Lilienthal, P. **Micropower system modeling with HOMER. Integration of Alternative Sources of Energy.** John Wiley & Sons, Inc.; 379-418, 2006.

Lilienthal, P.; Givler, T.; L. **National Renewable Energy. Using HOMER software, NREL's micropower optimization model, to explore the role of gen-sets in small solar power systems. Case study: SRI Lanka.** National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colo, 2014.

Mamaghani, A. H.; Escandon, S. A. A.; Najafi, B.; Shirazi, A.; Rinaldi, F. **Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in Colombia.** *Renewable Energy* 97, 293-305, 2016.

NASA/SSE. **Surface meteorology and energy.** 2016. Available at <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse>.

Perera, A.T.D.; Attalage, R.A.; Perera, K.K.C.K.; Dassanayake, V.P.C. **Designing standalone hybrid energy systems minimizing initial investment, life cycle cost and pollutant emission.** *Energy* 54, 220-230, 2013.

Ramli, M. A. M.; Hiendro, A.; Al-Turki, Y. A. **Techno-economic energy analysis of wind/solar hybrid system: Case study for western coastal area of Saudi Arabia.** *Renewable Energy* 91, 374-385, 2016.

Sandeep, G.; Vakula, V.S. **Optimal Combination and Sizing of a Standalone Hybrid Power System Using HOMER.** International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), 2016.

Santos, E. B.; Cavalcanti, L. L. F.; Cavalcanti, L. F.; Sobrinho, R. A. M.; Villarouco, V. **Ergonomic assessment of the constructed environment methodology: a study of experience in a restaurant university.** In: Proceedings of 15^o ERGODESIGN - International Conference on Ergonomics and Usability of Human-Technology Interfaces. UFPE, 2015.

Shezan, S. A., Julai, S., Kibria, M. A., Ullah, K. R., Saidur, R., Chong, W. T. **Performance analysis of an off-grid wind-PV (photovoltaic)-diesel-battery hybrid energy system feasible for remote areas.** *Journal of Cleaner Production*, 125, 121-132, 2016.

Sinha, S., & Chandel, S. S. **Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic-wind based hybrid energy systems.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 755-769, 2015.

Tong, W. **Wind Power Generation and Wind Turbine Design.** WIT Press, USA, p. 8, 2016.

Trojan Battery. 2020. http://www.trojanbattery.com/pdf/datasheets/L16PAC_Trojan_Data_Sheets.pdf.

University Restaurant, UFPE. 2020. Available in: https://www3.ufpe.br/restaurante/index.php?option=com_content&view=article&id=306&Itemid=175.

Capítulo 04

ESTUDO DE ECONÔMICO DE VIABILIDADE DE SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO PARA UM BLOCO DE ENSINO DE UMA UNIVERSIDADE PÚBLICA

WÊNIO FHARÁ ALENCAR BORGES¹, IGOR GUILHERME NASCIMENTO SILVA², KLÉBER LIMA CÉZAR³, PETTESON LINNIKER CARVALHO SERRA⁴, ANDRÉ SALES AGUIAR FURTADO⁵, FILIPI MACIEL DE MELO⁶, IGOR ANTONIO DE OLIVEIRA CARVALHO⁷

RESUMO

A busca por equipamentos elétricos mais eficientes tem sido cada vez mais significativa. No entanto, não basta apenas os aparelhos serem mais eficientes, o cálculo de carga térmica das construções deve ser bem detalhado para que os sistemas selecionados não se tornem sub ou superdimensionados, otimizando-se o seu consumo de eletricidade. Além de um consumo mais eficiente, é necessário que o sistema de climatização forneça um ótimo conforto térmico para que os ocupantes do recinto maximizem suas atividades. Desta forma, o presente trabalho se propôs a selecionar detalhadamente através de cálculo de carga térmica, um sistema de ar condicionado que seja vantajoso frente ao atual sistema utilizado no “Bloco 10 - Departamento de engenharia mecânica”, da Universidade Federal do Piauí (UFPI). Por meio deste estudo, determinou-se que a carga térmica demandada é de 74,03 TR e que o sistema de climatização, dentre os estudados, mais apropriado é o do tipo self-contained. A substituição do atual sistema pelo sugerido neste projeto é mais eficiente e gera uma redução de aproximadamente 10% no consumo de eletricidade para o mês de maior consumo.

Palavras-chave: Ar-condicionado. Eficiência elétrica. Conforto. Carga térmica.

1. INTRODUÇÃO

O principal meio de controle de temperatura do ar se dá pelo ar-condicionado, termo esse que foi primeiramente dito em 1906, com o norte-americano Stuart Cramer, que necessitava explorar uma forma de acrescentar umidade ao ar em sua fábrica têxtil. Apesar de ter sido Cramer

¹Mestre em Engenharia Mecânica (UFPE), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Pedreiras, Pedreiras-MA.

E-mail: wenio.borges@ifma.edu.br

²Bacharel em Engenharia Mecânica (UFPI), Universidade Federal do Piauí – UFPI, Teresina-PI.

E-mail: igormam@hotmail.com

³Doutor em Engenharia Mecânica (UFPB), Universidade Federal da Paraíba – UFPB, João Pessoa-PB.

E-mail: kleber@ufpi.edu.br

⁴Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais (UFPI), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB, Campus Cajazeiras, Cajazeiras-PB.

E-mail: plinniker@gmail.com

⁵Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais (UFPI), Universidade Federal do Piauí – UFPI, Teresina-PI.

E-mail: salesandre7@gmail.com

⁶Mestre em Engenharia Mecânica (UFPB), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Timon, Timon-MA.

E-mail: filipi.melo@ifma.edu.br

⁷Mestre em Engenharia de Materiais (UFPI), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Timon, Timon-MA.

E-mail: igor.carvalho@ifma.edu.br

o primeiro a definir um nome para o dispositivo, Willis Carrier, também norte-americano, já havia incrementado em 1902 o primeiro dispositivo que utilizava um processo mecânico a fim de condicionar o ar (Neves, 2018).

No Brasil, segundo a ABRAVA (2019) (Associação Brasileira de Refrigeração, Ar condicionado, Ventilação e Aquecimento), os sistemas de condicionamento de ar são responsáveis por abrigar aproximadamente de 30 a 40% do consumo total de energia elétrica. Pesquisas feitas pela ELETROBRÁS (2009) (Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética) mostram que o consumo de energia elétrica em prédios públicos, objeto do presente trabalho, representa 48% do consumo total e que os principais tipos de condicionador utilizado são dos tipos janela e split (Fig. 1).

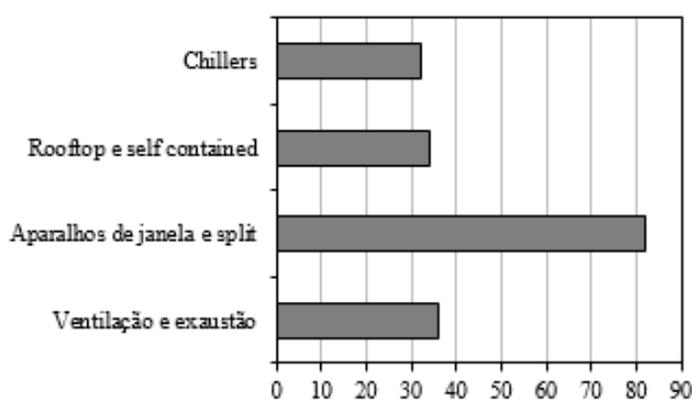


Figura 1. Tipos de condicionadores de ambiente presentes em prédios públicos (ELETROBRÁS, 2009).

Na cidade de Teresina, localizada na região Nordeste do Brasil, a demanda por ar condicionado vem crescendo de forma abrupta. A capital está localizada em uma faixa de transição entre o semiárido nordestino e a região amazônica. É a única capital do Nordeste a situar-se no interior, a uma distância de 350 km do litoral e possui uma temperatura média anual de 26,7°C, segundo o INMET (2019), Instituto Nacional de Meteorologia. Caracteriza-se por um clima bastante quente e seco, necessitando na maioria dos locais de um condicionador de ar para atingir o conforto térmico.

Destarte, o presente trabalho visa realizar a seleção de um sistema de refrigeração para o “Bloco 10 - Departamento de engenharia mecânica”, do Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal do Piauí (UFPI). É objetivo, ainda, fazer um comparativo econômico, durante o mês de maior necessidade de carga térmica, entre o atual sistema e a possível substituição por um novo sistema aqui proposto, denotando a importância da adaptação a um novo projeto que esteja em sintonia conforto térmico e eficiência energética.

2. CARGA TÉRMICA

A carga térmica é a quantidade de calor sensível e calor latente, geralmente expressa em BTU/h, ou kcal/h, que deve ser retirada ou colocada no recinto a fim de proporcionar as condições de conforto desejadas (Creder, 2004). Para a realização correta e qualificada do projeto, leva-se em consideração alguns parâmetros para o cálculo da carga térmica, que segundo Pirani (2004) são eles:

- a) Carga térmica devido à transmissão de calor pelas paredes, teto e piso;
- b) Carga térmica devido à infiltração de ar externo quando da abertura e fechamento das portas de acesso;
- c) Carga térmica devido a luzes, pessoas, e outras fontes de calor no interior do ambiente.

2.1. Carga térmica devido à condução e insolação em superfícies opacas

A carga térmica devido à condução é a energia térmica gerada da diferença de temperatura entre o ambiente externo e o interno, e transferida por meio das paredes, pisos e teto, calculada pela equação:

$$Q_{ins} = A \cdot U \cdot [(T_e - T_i + \Delta T)] \quad (1)$$

Onde: Q_{ins} = Carga térmica devido à insolação, em kcal/h; A = Área de troca de calor, em m^2 ; U = Coeficiente global de transmissão de calor, $W/m^2 \cdot ^\circ C$; T_e = Temperatura externa; T_i = Temperatura interna, em $^\circ C$; ΔT = Acréscimo de temperatura, quando houver, devido à insolação, em $^\circ C$.

2.2. Carga térmica devido à insolação

A carga térmica de insolação é a transferência de energia térmica causada pela incidência de radiação solar direta sobre as paredes do ambiente refrigerado e leva em consideração alguns parâmetros, tais como: coordenadas geográficas do local, inclinação dos raios do sol, tipo de construção da fachada, cor e rugosidade da superfície, bem como sua refletância.

2.2.1. Cálculo para superfícies transparentes

Para o cálculo da transmissão de calor do sol através de superfícies transparentes utiliza-se a equação seguir:

$$Q_{ins} = \beta \cdot A \cdot \gamma \quad (2)$$

Onde: Q_{ins} = Carga térmica devido à insolação, em kcal/h; β = Coeficiente de transmissão do calor solar através de vidros, kcal·m²/h; A = Área de troca de calor, em m²; γ = Fator de redução, que depende da proteção da superfície externa.

2.3. Carga térmica devido a pessoas

Todo ser humano emite calor sensível e calor latente, que variam conforme esteja o indivíduo em repouso ou em atividade (Creder, 2004). Tal energia dissipada pelo ser humano no ambiente influencia diretamente no cálculo final da carga térmica. Calcula-se a carga térmica referente às pessoas, utilizando-se as expressões a seguir:

$$\begin{aligned} Q_{sen} &= S_1 \cdot N \\ Q_{lat} &= S_2 \cdot N \end{aligned} \quad (3)$$

$$Q_{pessoas} = Q_{sen} + Q_{lat}$$

Onde: Q_{sen} = Carga térmica devido ao calor sensível, em kcal/h; S_1 = Calor sensível liberado pelos ocupantes; N = Número de pessoas no ambiente climatizado; Q_{lat} = Carga térmica devido ao calor latente, em kcal/h; S_2 = Calor latente liberado pelos ocupantes; $Q_{pessoas}$ = Carga térmica devido ao número de pessoas, em kcal/h.

2.4. Carga térmica devido aos equipamentos

Todos os equipamentos que se fazem presentes no ambiente a ser climatizado emitem uma determinada energia térmica que deve ser inserida no cálculo total, mesmo ele não estando em atividade durante todo o tempo de trabalho, o cálculo é dado por:

$$Q_{equip} = P \cdot N \quad (4)$$

Onde: Q_{equip} = Carga térmica devido ao equipamento, em kcal/h; P = Potência dissipada pelo equipamento, em W; N = Número de equipamentos.

2.5. Carga térmica devido à iluminação

A carga térmica de iluminação é resultado da energia térmica dissipada por lâmpadas instaladas no ambiente climatizado. Ela pode ser calculada de acordo com a equação seguir:

$$Q_{ilum} = P \cdot A \quad (5)$$

Onde: Q_{ilum} = Carga térmica devido às lâmpadas, em kcal/h; P = Potência dissipada pela lâmpada, em W; A = Área do ambiente climatizado, em m^2 .

2.6. Carga térmica devido à renovação de ar

O item 5 da NBR 16401-3 (2008) estipula a vazão mínima de ar exterior de qualidade aceitável a ser suprida pelo sistema para promover a renovação de ar interior e manter a concentração dos poluentes no ar em nível aceitável. Sabe-se que em um recinto fechado em que há uma quantidade considerável de pessoas e sem a renovação de ar, os níveis de CO_2 irão aumentar e causar sensação de sonolência e dores de cabeça nos indivíduos presentes. Tal necessidade ocasiona um aumento de carga térmica devido ao insuflamento do ar por meio da ventilação. Seguindo a norma, deve-se calcular primeiramente a vazão eficaz, que depende do número de pessoas e da área, como mostra a equação abaixo:

$$V_{ef} = (P_z \cdot F_p) + (A_z \cdot F_a) \quad (6)$$

Onde: V_{ef} = Vazão eficaz de ar exterior, em l/s; P_z = Número máximo de pessoas na zona de ventilação; F_p = Vazão por pessoa em l/s; A_z = Área útil ocupada pelas pessoas, em m^2 ; F_a = Vazão por área útil ocupada, em l/s· m^2 .

Com a vazão eficaz calculada, pode-se encontrar a vazão necessária para a renovação de acordo com:

$$V_z = (V_{ef} / E_z) \quad (7)$$

Onde: V_z = Vazão necessária para a renovação, em l/s; V_{ef} = Vazão eficaz de ar exterior, em l/s; E_z = Eficiência da distribuição de ar no ambiente climatizado.

E quanto à carga térmica total devido à ventilação, esta é a soma dos fatores de calores sensíveis e calores latentes, de acordo com as seguintes equações:

$$\begin{aligned}Q_{sen} &= V_z \cdot 3,6 \cdot 0,29 \cdot (T_e - T_i) \\Q_{lat} &= V_z \cdot 3,6 \cdot 699,2 \cdot (W_e - W_i) \\Q_{vent} &= Q_{sen} + Q_{lat}\end{aligned}\tag{8}$$

Onde as variáveis já foram apresentadas anteriormente, e os dados que se fizerem necessários estão dispostos em anexos da norma.

2.7. Carga térmica total

A carga térmica total é obtida por meio do somatório de todas as contribuições de cargas térmicas, e como forma de segurança, foi aumentado em 10% do total em relação aos dutos de insuflamento, perdas no motor/ventilador e coeficiente de segurança.

3. COMPOSIÇÃO ATUAL DO BLOCO 10 - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Atualmente o “Bloco 10 - Departamento de engenharia mecânica” conta com treze *splits* do tipo “piso teto R-410A” da marca KOMECO, com uma capacidade de refrigeração de 55000 BTU/h, além de quatorze *splits* do modelo convencional tipo “inverter”, também da marca KOMECO, com uma capacidade de 18000 BTU/h, sendo cada *split* interligada a sua própria unidade condensadora.

4. METODOLOGIA

O presente trabalho adotou o método de cálculo de carga térmica máxima, no qual admite-se que a condição mais indesejada se repita com uma alta frequência durante o mês em que ocorre a maior necessidade de carga térmica, que de acordo com a NBR 16401-1 (2008), para a cidade de Teresina-PI é o mês de outubro.

Em consonância com o item 6.1.3.3 da NBR 16401-1 (2008), considerando-se o espaço com um número relativamente pequeno de zonas térmicas, será adotado o método da ASHRAE CLTD/CLF – *Cooling Load Temperature Difference/Cooling Load Factor* (Diferença de temperatura da carga de resfriamento/Fator de carga de resfriamento), que consiste em tabelas de fatores e coeficientes pré-calculados para construções e situações típicas.

A realização dos cálculos foi por meio de inserção das Eqs. 1, 2, 3, 4, 5 e 8, encontradas na literatura em uma planilha no Excel®. É importante ressaltar que o cálculo de carga térmica devido à condução e à insolação foi feito como sendo único, a fim de se sintetizar a planilha, sendo denominado, portanto, de cálculo devido às cargas externas.

Após os cálculos de cargas térmicas, a seleção dos equipamentos a serem utilizados e a posterior análise comparativa, em termos econômicos e em relação ao sistema de climatização vigente, foram realizadas.

4.1. Áreas climatizadas

O “Bloco 10 - Departamento de engenharia mecânica” foi dividido em áreas climatizadas, separadas pelos pisos inferior e superior, onde obteve-se separadamente valores de cargas térmicas, após a inserção dos dados referentes à cada área climatizada, na planilha Excel® de cálculos. É importante ressaltar que pisos, tetos e paredes que estão em contato com outro ambiente climatizado não são levados em consideração no cálculo.

Quanto à divisão das áreas climatizadas, foram coletadas informações acerca de nove lugares, conforme mostra a seguinte Tab. 1.

Tabela 1. Áreas climatizadas (Autor, 2020)

| Identificação da área | Ambiente | Área (m ²) |
|-----------------------|--------------------------------------|------------------------|
| 1 | Coordenação | 62,39 |
| 2 | Laboratório de informática | 94,25 |
| 3 | Laboratório de metalografia | 61,29 |
| 4 | Laboratório de metrologia | 69,60 |
| 5 | Laboratório de térmicas e pneumática | 94,25 |
| 6 | Laboratório de vibrações | 30,52 |
| 7 | Oficina | 151,89 |
| 8 | Salas de aula (1, 2 e 3) | 3 x 62,39 (187,17) |
| 9 | Salas dos professores (1 e 2) | 61,17 |

4.2. Seleção de equipamentos

Creder (2004) afirma que em locais com uma área maior do que 400m², a demanda de carga térmica é melhor suprida por meio de sistemas *self-contained*s ou de água gelada, ambos por condensação a ar ou a água.

A partir de então, faz-se necessário determinar a quantidade total de ar a ser insuflado para determinar o modelo específico que será escolhido. Para tal, utiliza-se a equação abaixo,

$$Q_{ins} = (Q_{sen}/0,29 \cdot (T_i - T_{ins}))$$

9)

Onde: Q_{ins} = Vazão de insuflamento, em m³/h; Q_{sen} = Calor Sensível total do ambiente, em kcal/h; T_i = Temperatura interna do ambiente climatizado, em °C; T_{ins} = Temperatura de insuflamento, em °C.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Dados de climatização para os ambientes

Coletando-se os dados médios para a cidade de Teresina-PI, de acordo com a NBR 16401-1 (2008), encontra-se uma temperatura de bulbo seco de 37,9°C e a de bulbo úmido de

27,9°C, uma latitude de 5,05°S e longitude de 42,82°W, com pressão atmosférica de 100,5 kPa a uma altitude de 69 m.

Considerando as condições de conforto, NBR 16401-2 (2008), e para a condição de projeto aqui proposto, a temperatura do ambiente deve ser de 23°C e a umidade relativa de 50%. Utilizando-se uma carta psicrométrica, foi possível determinar os valores de umidade absoluta para o ambiente climatizado (8,8201 g/kg) e para o externo (19,9211 g/kg).

Uma vez definidos estes dados são possíveis determinar a carga térmica total necessária para climatizar todo o departamento.

5.2. Cargas térmicas

Após a inserção dos dados nas Eqs. 1, 2, 3, 4, 5 e 8, em uma planilha no Excel®, obteve-se as cargas térmicas totais, nas quais inclui às cargas externas, mais as cargas associadas com pessoas, equipamentos, iluminação e renovação de ar. Assim, a carga térmica total é calculada através da soma de toda a carga térmica necessária em todos os ambientes climatizados. A Tab. 2 apresenta os valores referentes a cada área climatizada analisada.

Tabela 2. Carga térmica total referente a todos as áreas climatizadas (Autor, 2020)

| Identificação da área | Ambiente | Carga térmica (Q) |
|-----------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| 1 | Coordenação | 13120,20 kcal/h (4,34 TR) |
| 2 | Laboratório de informática | 40220,93 kcal/h (13,30 TR) |
| 3 | Laboratório de metalografia | 11468,34 kcal/h (3,79 TR) |
| 4 | Laboratório de metrologia | 11490,20 kcal/h (3,80 TR) |
| 5 | Laboratório de térmicas e pneumática | 18037,54 kcal/h (5,96 TR) |
| 6 | Laboratório de vibrações | 7118,89 kcal/h (2,35 TR) |
| 7 | Oficina | 27520,88 kcal/h (9,10 TR) |
| 8 | Salas de aula (1, 2 e 3) | 89379,48 kcal/h (29,56 TR) |
| 9 | Salas dos professores (1 e 2) | 14440,57 kcal/h (4,78 TR) |

Pela análise da Tab. 2, pode-se concluir que pelo somatório das cargas térmicas de cada local selecionado do “Bloco 10 - Departamento de engenharia mecânica”, chegou-se a um total de carga térmica demandada de 232797,02 kcal/h ($Q_{sen} = 167357,31$ kcal/h = 55,34 TR e $Q_{lat} = 65439,70$ kcal/h = 21,64 TR), totalizando 76,98 TR.

5.3. Seleção do equipamento

Somando-se todas as áreas climatizadas do “Bloco 10 - Departamento de engenharia mecânica” (salas de aula e de professores, laboratórios, oficina e coordenação), encontra-se um valor de 812,53 m². Diante disso, por meio da literatura, chega-se, portanto, na sugestão de se utilizar um equipamento do tipo *self-contained* para a climatização total do prédio.

Determinando-se agora o FCS (fator de calor sensível), percentual de calor sensível para o calor total, é possível encontrar todas as condições de insuflamento.

$$FCS = (Q_{sen}/Q) = (55,34/76,98) = 0,72 \quad (10)$$

Utilizando-se ainda uma carta psicrométrica, e considerando uma umidade relativa de 90% do ar após passar pelas serpentinas, é possível determinar a temperatura de insuflamento. Pela análise da carta, encontra-se o valor de 10°C para a temperatura de bulbo seco de insuflamento, logo, pela Eq. (9), tem-se que,

$$Q_{ins} = (167357,11/0,29 \cdot (23^\circ - 10^\circ)) = 44391,81 \text{ m}^3/\text{h}$$

Considerando que 1 TR pode ser associada com uma vazão de 680 m³/h, optou-se por selecionar quatro máquinas de 20 TR (54400 m³/h), da fabricante TRANE, do modelo SIVE 200, com dois condensadores remotos de gabinete único e uma vazão de ar de 20400 m³/h para cada *self-contained*, procurando-se, portanto, atender a demanda necessária, e considerando-se uma possível adição de uma futura sala de aula, no “Bloco 10 - Departamento de engenharia mecânica”.

5.4. Consumo de eletricidade

De acordo com a seleção das quatro máquinas modelo SIVE 200 e supondo que elas estarão funcionando na sua máxima capacidade (valores elétricos especificados pelo fabricante), e definindo que o expediente do prédio seja de 12 horas, durante 30 dias no mês de outubro (pior mês), o valor de energia total gasta é de 31708,8 kWh/mês.

Utilizando-se a tabela de tarifas (setembro/2020) disponibilizada pela Equatorial Energia-Piauí, é possível identificar o valor gasto de consumo elétrico do equipamento selecionado, que para o tipo de empreendimento estudado é de 0,974685 R\$/kW, totalizando-se assim, um valor de R\$ 30906,10 para o mês de outubro.

De acordo com as especificações técnicas contidas no manual fornecido pelo fabricante, cada *split* do tipo “piso teto” consome 5,674 kW. Assim, mantendo-se as mesmas condições de expediente, obtém-se um consumo mensal de 26554,32 kWh para os 13 modelos. De maneira análoga, para os 14 *splits* convencionais do tipo “inverter”, cada um consumindo um valor de 1,627 kW, obtém-se um consumo mensal de 8200,08 kWh.

Comparando-se em termos econômicos ambos os sistemas: atual e proposto, chega-se à seguinte conclusão: o valor total de energia consumida para o mês de outubro (pior mês), pelo atual sistema de climatização é de 34754,4 kWh, representando um custo mensal de R\$ 33874,89, e quando comparado com o sistema proposto, com consumo mensal de energia de 31708,8 kWh, e com custo de R\$ 30906,10, o sistema atual representa um aumento de consumo de energia de 9,6% a mais do que o sistema proposto no presente trabalho.

Resumindo-se na Tab. 3, tem-se como resultado comparativo entre ambos os sistemas (atual e proposto), os seguintes resultados:

Tabela 3. Resultado comparativo entre os sistemas (Autor, 2020)

| | Consumo de eletricidade (kWh/nês) | Consumo mensal - outubro (R\$) |
|------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Sistema atual | 34754,40 | 33874,89 |
| Sistema proposto | 31708,80 | 30906,10 |

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho se propôs a selecionar um sistema de climatização por meio de uma análise comparativa em termos econômicos, para o mês de maior necessidade de carga térmica, no “Bloco 10 - Departamento de engenharia mecânica”, da Universidade Federal do Piauí (UFPI), entre o atual sistema empregado e um novo aqui proposto neste trabalho.

Diante da problemática apresentada, o projeto apresentou resultados satisfatórios quanto ao sistema de climatização escolhido, e, pela análise comparativa, levando-se em consideração o conforto térmico/eficiência energética, comprovou-se que a alteração do sistema atual de climatização pelo sistema proposto neste trabalho leva-se a uma redução de custo de energia elétrica para o mês mais quente do ano na cidade de Teresina (outubro), de aproximadamente 10%.

A opção de sistema adotada para atender a carga térmica foi o uso de equipamento de expansão direta com um sistema central de distribuição, o *self-contained*, devido ao fato de que a utilização de *chillers* e *fancoils* (expansão indireta) inviabilizaria o projeto quanto à questão econômica, além de que a carga térmica necessária não foi demasiadamente alta e a área total climatizada não foi classificada como de um empreendimento de grande porte.

7. REFERÊNCIAS

ABNT, 2008. **NBR 16401-1: Instalações de ar condicionado – sistemas centrais e unitários.** Parte 1: Projeto das instalações. Rio de Janeiro, Brasil.

_____. Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro, Brasil.

_____. Parte 3: Qualidade do ar interior. Rio de Janeiro, Brasil.

ABRAVA, 2019. **O uso do ar condicionado e o consumo de energia elétrica.** Disponível em: <<https://abrava.com.br/o-uso-do-ar-condicionado-e-o-consumo-de-energia-eletrica-abrava/>>. Acesso em: 10/09/2020.

CREDER, H., 2004. **Instalações de ar-condicionado.** LTC, Rio de Janeiro, 6ª edição.

ELETROBRAS, 2009. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso, ano base 2005: classe Residencial Relatório Brasil - Sumário Executivo.** Rio de Janeiro: ELETROBRAS; PROCEL, 187 p. (Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil). Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/>>. Acesso em: 22/10/2020.

INMET, 2019. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=tempo/graficos>>. Acesso em: 26/10/2020

NEVES, S.A., 2018. **História do ar-condicionado**. Disponível em: <<https://cemeq.ufg.br/n/103153-a-historia-do-ar-condicionado>>. Acesso em: 20/10/2020.

PIRANI, M. J., 2004. **Apostila refrigeração e ar condicionado**. Universidade Federal da Bahia, Departamento de engenharia mecânica.

Capítulo 05

APLICAÇÃO DE PROJETO MECÂNICO NO DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA ÁREAS RURAIS

WÊNIO FHARÁ ALENCAR BORGES¹, ANDRÉ SALES AGUIAR FURTADO², FILIPI MACIEL DE MELO³, IGOR ANTONIO DE OLIVEIRA CARVALHO⁴

RESUMO

Alguns estados da região nordestina brasileira são caracterizados pela sua pobreza e na maioria das vezes pela falta de necessidades básicas. Adicionalmente, existem ainda muitas famílias que vivem em áreas isoladas que são quase impossíveis de obter fornecimento de energia devido à distância entre elas e a cidade, o que encarece os custos. Baseado nessas premissas, um sistema para coletar energia solar a fim de suprir as necessidades energéticas de uma residência familiar com 4 pessoas em uma área isolada (4,99°S e 42,69°O), perto da cidade de Teresina-PI, Brasil, foi projetado a fim de ser expandido para outras comunidades isoladas. O objetivo do projeto é obter um sistema que tenha execução viável comparado com ao uso de energia elétrica na região. Neste projeto, a quantidade de energia necessária para suprir as necessidades foi calculada e depois algumas hipóteses foram feitas para dimensionar o sistema fotovoltaico e as baterias. Para isto, cálculos foram feitos para determinar valores como fator de correção e quantidade de coletores. Para considerar os custos de implementação, uma tabela foi criada e os valores do Sistema Solar e Energia Elétrica foram comparados. A fim de prever algumas modificações, todo o projeto deve ser instalado.

Palavras-Chave: Sistema fotovoltaico, residência, áreas isoladas.

1. INTRODUÇÃO

Embora possua um excelente potencial de produção de energias renováveis, no Brasil opta-se por utilizar somente a energia hidrelétrica como a principal geradora de eletricidade. Segundo dados do Banco de Informações da Geração (BIG) da Aneel (2015), as usinas hidrelétricas respondiam por 66,21% da potência total instalada no país, seguida de 28,09% da potência proveniente das usinas termelétricas, de um total de 135,370 mil MW. Quanto à energia eólica, o percentual de energia gerada é equivalente a pouco mais de 4,2% do total, embora possua um grande potencial disponível. Referindo-se a energia solar, o país é considerado de grande potencial de geração, principalmente quando se leva em consideração as regiões norte e nordeste, onde a incidência solar é constante em quase todo o ano. Entretanto, a falta de

¹Mestre em Engenharia Mecânica (UFPE), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Pedreiras, Pedreiras-MA.

E-mail: wenio.borges@ifma.edu.br

²Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais (UFPI), Universidade Federal do Piauí – UFPI, Teresina-PI.

E-mail: salesandre7@gmail.com

³Mestre em Engenharia Mecânica (UFPB), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Timon, Timon-MA.

E-mail: filipi.melo@ifma.edu.br

⁴Mestre em Engenharia de Materiais (IFPI), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Timon, Timon-MA.

E-mail: igor.carvalho@ifma.edu.br

conhecimentos técnicos e de investimentos na área, torna a sua produção uma fonte, pouco ou não utilizável, e de alto custo.

Neste contexto, situa-se o estado do Piauí, uma região caracterizada pela escassez de indústrias e por uma população, na sua maioria, vivendo em condições precárias, onde o acesso à eletricidade ainda é complexo. Neste sentido, é justificável a falta de energia estar diretamente relacionada com a maioria dos problemas sociais críticos que afetam o desenvolvimento sustentável: pobreza, acesso aos serviços sociais, disparidades, crescimento populacional, economia e segurança (BASSAM, 2001). Devido a sua grande extensão territorial, a distribuição de energia elétrica torna-se complicada e de elevado custo. Além disso, a qualidade em que essa energia chega a sua destinação final é considerada de baixa qualidade e com sérios problemas quanto aos picos de tensões que ocorrem. Por outro lado, o estado pode-se superar esse problema, uma vez que possui um ótimo potencial para a geração de energia solar, cuja sua proximidade com a linha do Equador facilita o recebimento de altas incidências de radiações solares durante todo o ano.

Baseado na necessidade de melhorar a qualidade de vida da população do estado do Piauí em termos de energia solar, a sua capital foi escolhida para o desenvolvimento deste projeto. Embora o estado possua algumas desvantagens por não ser um estado tão desenvolvido, a irradiação solar na região é de ótima qualidade, o que poderá trazer melhorias em termos de industrialização, e com isso, gerando empregos e renda para a população mais necessitada. Mundialmente, mais de 1,5 bilhões de pessoas não tem acesso a fontes de energias modernas por estarem vivendo em áreas rurais (IEA, 2009). E na grande Teresina, muitas famílias vivem em áreas isoladas que é quase impossível obter fornecimento de energia devido à distância destas áreas até a cidade. Por este motivo, os custos para levar eletricidade para essas áreas são elevadíssimos.

Neste artigo, um sistema para coletar energia solar e suprir a necessidade energética de uma simples casa, localizada na zona rural de Teresina-PI, de uma família composta por 4 pessoas é desenvolvido com a pretensão de ser expandida para comunidades isoladas. Hipóteses como as médias temperaturas da região e a voltagem do sistema são consideradas na análise, para se determinar o número de módulos. Os resultados obtidos a partir do projeto fotovoltaico são comparados com os custos provenientes da distribuição de energia elétrica. O objetivo do projeto é desenvolver um sistema de geração de energia fotovoltaica que possua uma execução viável comparada com a utilização de energia elétrica distribuída na região.

2. MÉTODOS

2.1. Visão geral do sistema

O projeto do sistema de geração de energia solar desenvolvido neste artigo é baseado na localização de uma simples casa localizada na zona rural (4,99°S e 42,69°O), perto da cidade de

Teresina-PI, Brasil. O sistema consiste de módulos fotovoltaicos conectados a dispositivos que irá converter a energia produzida de acordo com o valor desejado para a tensão de saída. Inversores e rastreadores de ponto de potência máximo (MPPT) comerciáveis são utilizados para obter esse valor de voltagem desejado dos módulos solares.

A Fig. 1 mostra um esquema simples do sistema fotovoltaico. O módulo escolhido foi o modelo YL240P-32b, da Yingli Energy, com as seguintes especificações: material (ms-Si), eficiência (13,4%), potência nominal P_{MPP} (240 W_p), voltagem nominal V_{MPP} (32,2 V), voltagem corrente aberta V_{oc} (40,5 V), corrente em circuito aberto I_{sc} (8,15 A), NOCT (46 °C), coef. de temp. de $P_{máx}$ (-0,45 %/°C), coef. de temp. de V_{oc} (-0,37 %/°C), coef. de temp. de I_{sc} 0,006 %/°C) e dimensões 1,81 x 0,99. E o inversor escolhido foi o modelo SPR-3000m, da SunPower, com as seguintes especificações: potência máxima (3600 W), rastreador de ponto de potência máximo MPP (200 - 400 V), tensão de entrada de operação de voltagem (200 - 500 V), máxima corrente de entrada AC (17 A) e dimensões 0,45 x 0,35. Estes equipamentos foram utilizados nesta análise devido ao seu custo-benefício e por serem típicos nesse modelo de projeto. Duas eficiências de conversão energética estão em destaque na figura. A primeira eficiência é η_{mp} , que é a eficiência atual do ponto de potência máximo das células solares e relaciona a eficiência de conversão da energia solar incidente com a energia elétrica no arranjo. A segunda eficiência é $\eta_{elétrica}$, que é a eficiência da eletrônica de potência (inversores) que interconectam voltagem e corrente, otimizando a impedância do arranjo para a potência máxima.

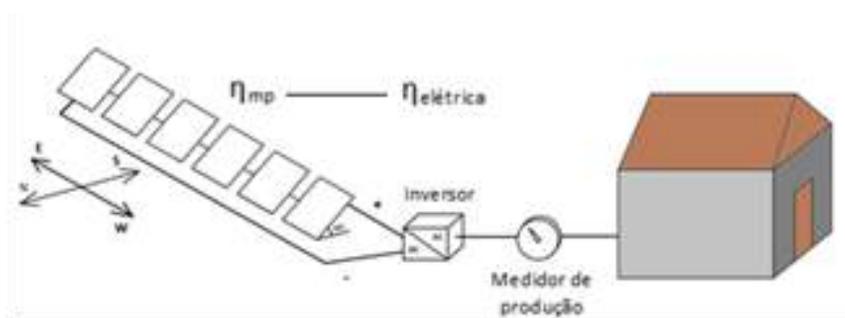
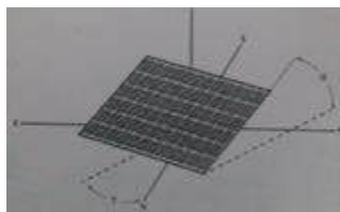


Figura 1. Esquema do sistema solar projetado.

Fonte: Autoria própria.



Detalhe 1. Ângulos importantes.

Fonte: Autoria própria.

2.2. Análise da geometria solar

Existem diferentes estudos na literatura falando sobre a orientação dos arranjos solares e poucas convergências sobre seus benefícios. Para arranjos com orientações fixas, um livro cita que um ótimo ângulo de inclinação seria o ângulo da latitude local mais 10° (HANKINS, 1995), enquanto os resultados de outros estudos indicam que a melhor inclinação para um arranjo fixo seria simplesmente igual à latitude local (GORDON E RABL, 1982) e (GORDON E WENGER, 1991). Neste caso, como a latitude é igual a 4,99°, a Cepel (2015) sugere que o mínimo valor a se utilizar para o ângulo de inclinação do arranjo seja igual a 10°. O detalhe 1, da Fig. 1 mostra importantes ângulos, como o ângulo de inclinação do arranjo (α) e o ângulo azimutal do arranjo (γ). Observe que o ângulo de inclinação do arranjo a 0° é horizontal e a 90° é vertical voltado para o horizonte. O azimute do arranjo varia de -180° a 180°. Por convenção, um azimute de 0° indica um arranjo voltado para o sul e uma vez que o caso em estudo aqui é uma casa no hemisfério sul, isto implica em um arranjo voltado para o norte. Um azimute positivo indica rotação para o oeste e negativo azimute indica rotação para o leste. Um azimute de 180° ou -180° indica um arranjo voltado para o norte.

Valores de insolação média mensal para um típico ano meteorológico (TMY) de Teresina são obtidos de um projeto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2015) e mostrados na Tabela 1. Neste estudo, esses dados são usados para obter os valores para a insolação média total mensal nos coletores solares. A partir desses valores é possível determinar a quantidade de energia produzida, consumida e que sobrar. Neste projeto, valores plausíveis para a insolação média total mensal (IT) são determinados e mostrados na Tabela 2, a partir das fórmulas obtidas de Masters (2013a).

$$\delta = 23.45 * \sin\left[\frac{360}{365} * (n - 81)\right] \quad (1)$$

$$\beta = \sin^{-1}[\cos(L) * \cos(\delta) * \cos(H) + \sin(L) * \sin(\delta)] \quad (2)$$

$$\cos(\theta) = \cos(\beta) * \cos(\phi_s - \phi_c) * \sin(\Sigma) + \sin(\beta) * \cos(\Sigma) \quad (3)$$

$$I_{BC} = DNI * \cos(\theta) \quad (4)$$

$$I_{RC} = GHI * \rho * \left(\frac{1 - \cos(\Sigma)}{2}\right) \quad (5)$$

$$I_{DC} = DHI * \left(\frac{1 + \cos(\Sigma)}{2}\right) \quad (6)$$

$$I_T = I_{BC} + I_{RC} + I_{DC} \quad (7)$$

$$I_T = I_{BC} + I_{RC} + I_{DC} \quad (7)$$

Portanto, a insolação média total mensal (IT), que é determinada a partir da soma dos resultados dos cálculos das seguintes insolações nos coletores: difusa (I_{DC}), de feixe (I_{BC}) e refletida (I_{RC}), tais que são funções das irradiações: horizontal difusa (DHI), normal direta (DNI) e horizontal global (GHI). O reflexo do solo é representado por ρ .

Tabela 1. Insolação média mensal para um típico ano meteorológico (TMY) de Teresina.

| | JAN | FEV | MAR | ABR | MAIO | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ | ANUAL |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| DNI | 4312,71 | 4092,82 | 4827,96 | 5253,01 | 5081,68 | 6298,33 | 4593,31 | 6472,27 | 6069,36 | 6379,62 | 6076,02 | 5100,08 | 5333,42 |
| GHI | 5355,60 | 5624,92 | 5781,65 | 5627,23 | 5442,25 | 5363,18 | 4593,31 | 6141,05 | 6249,58 | 6516,44 | 6332,10 | 5634,26 | 5676,68 |
| DHI | 2516,86 | 4092,82 | 2422,13 | 2071,58 | 1987,08 | 1539,98 | 1758,81 | 1862,01 | 2136,31 | 2049,20 | 2124,69 | 2275,48 | 2208,81 |

Tabela 2. Insolação média total mensal para Teresina.

| Insolação Média Mensal (Wh/m ² /d) | | | | | | | | | | | | |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|
| | JAN | FEV | MAR | ABR | MAIO | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ |
| I_T | 6792,68 | 8161,30 | 7195,43 | 7301,91 | 6915,41 | 7516,20 | 6156,52 | 8253,81 | 8191,70 | 8394,98 | 8178,17 | 7372,78 |
| E_{prod.} | 8118,61 | 9754,39 | 8599,98 | 8727,25 | 8265,30 | 8983,37 | 7358,27 | 9864,95 | 9790,72 | 10033,68 | 9774,55 | 8740,23 |
| E_{usad.} | 7857,74 | 8699,64 | 7857,74 | 8119,67 | 7857,74 | 8119,67 | 7857,74 | 7857,74 | 8119,67 | 7857,74 | 8119,67 | 7857,74 |
| E_{net.} | 260,87 | 1054,75 | 742,24 | 607,58 | 407,55 | 863,70 | -499,47 | 2007,21 | 1671,06 | 2175,94 | 1654,89 | 882,49 |

2.3. Análise da quantidade de energia necessária

Para projetar um sistema de energia solar que alimente uma residência completa, é essencial analisar e calcular a quantidade de energia necessária para suprir todas as necessidades. Considerando alguns dos itens essenciais em uma casa, como: som, computador, chuveiro elétrico, micro-ondas, batedeira, geladeira, máquina de lavar, liquidificador, ventilador e lâmpadas foi determinado o valor de 202,99 kWh/mês para este projeto.

2.4. Análise dos módulos fotovoltaicos (PV's)

Para simular o desempenho realístico do módulo fotovoltaico (PV), os dados de desempenho do fabricante em condições padrão de testes (STC) (insol. de 1 KW/m², mas. de ar de 1,5 e temp. da célula do módulo solar de 25°C) e a temp. operacional de funcionamento nominal nas condições de temp. das células (T_{NOCT} , irrad. de 800 W/m², vel. do vento de 1 m/s e temp. ambiente de 20°C) foram considerados. Além destes, outros fatores foram considerados no dimensionamento do sistema fotovoltaico, como o fator de correção devido à temperatura e o número de módulos utilizados, etc.

Para o cálculo do fator de correção devido à temperatura ($FC_{temp.}$), são utilizados a média da máxima temperatura média do ano, que é igual a 29,3°C para o mês de outubro (CLIMA, 2015), e das especificações do módulo fotovoltaico, o $T_{NOCT} = 46^\circ\text{C}$. Como descrito por Masters (2013b), o fator de correção é determinado logo após o cálculo da temperatura da célula (T_{cell}), que é função ainda da temperatura ambiente ($T_{amb.}$), da irradiação solar (S) e do coeficiente de temperatura da potência máxima, nas seguintes equações:

$$T_{cell} = T_{amb.} + \frac{(T_{NOCT}-20^{\circ}\text{C})}{0.8} * S \quad ($$

8)

$$FC_{temp.} = 1 - Coef. temp. potência máx.* (T_{cell} - 25^{\circ}\text{C}) \quad ($$

9)

Para o cálculo da potência em corrente contínua (P_{DC}), o número de horas de pico de sol por dia precisa ser considerado. Para garantir o fornecimento de energia durante todos os meses do ano, escolheu-se o mínimo valor de pico de sol, obtido da Tabela 2, que é igual à insolação total de 6,15 h/d para o mês de julho.

$$P_{DC}(kW) = \frac{E_{neces.}}{FC_{temp.* (h/d do pico de sol)*(dias/ano)} \quad ($$

10)

Para o cálculo da área requerida, é utilizada a eficiência do módulo η que é igual a 13,4%. E nas condições padrão de testes, os painéis solares precisam entregar 1,57 kW. Logo, a área requerida será:

$$A (m^2) = \frac{P_{DC}}{1 kW/m^2 * \eta} \quad (1$$

1)

onde P_{DC} é a potência em corrente contínua, $1 kW/m^2$ é a insolação da superfície da terra e η é a eficiência do módulo. Quanto à determinação do número de módulos, utiliza-se a potência de pico obtida das especificações do módulo:

$$N^{\circ} \text{módulos} = \frac{P_{DC}}{P_{MPP}} \quad ($$

12)

onde P_{DC} é a potência em corrente contínua e P_{MPP} é a máxima potência de pico do módulo. Logo após, determina-se o número de módulos por cadeia, que é a relação entre a variação de tensão de rastreamento do ponto de potência máximo (MPP) do inversor e a tensão nominal do módulo.

Entretanto, para decidir-se quanto à quantidade de módulos a se utilizar, faz-se necessário verificar a mudança da tensão nominal (V_{oc}) relativa à mudança de temperatura da região. Assumindo que no horário mais frio e mais quente do dia para Teresina-PI, a temperatura seja de 22°C e 40°C respectivamente, a voltagem tende a aumentar para a menor temperatura e consequentemente diminuir para a maior temperatura. Analisa-se essa mudança de temperatura da tensão nominal relativa à hora mais fria e quente para a região através das equações (8) e (9), e utilizando-se os dados do módulo e do inversor. Para se chegar a uma conclusão do número de módulos a se utilizar por cadeia, necessita-se encontrar a quantidade de energia produzida, usando a seguinte expressão, com resultados mostrados na Tabela 2:

$$E_{prod.} = (n^{\circ} \text{módulos}) * (P_{MPP}) * (h/d \text{ do pico de sol}) * (FC_{temp.}) \quad (13)$$

onde P_{MPP} é a máxima potência de pico do módulo, $FC_{temp.}$ É o fator de correção devido à temperatura, e h/d é a quantidade de horas por dia de pico de sol.

2.5. Dimensionamento de Baterias

Sabendo-se da demanda necessária de corrente alternada para a casa, decidiu-se por dimensionar baterias que fornecessem 95% da disponibilidade do sistema durante uma média mensal do ano. As baterias serão mantidas em um local bem ventilado evitando-se superaquecimento, e cuja temperatura não será menor do que 10°C, haja vista que é quase impossível se alcançar essa temperatura em Teresina-PI.

Necessita-se estimar ambos a média e as cargas de pico que as baterias devem fornecer. Visto que as baterias irão entregar energia através de um controlador de carga e um inversor, precisa-se estimar sua eficiência. Nos picos, os inversores têm eficiências na faixa de 90%, mas com significantes frações menores do que as cargas de pico, uma eficiência total de mais de 85% é razoável. Estimando-se a eficiência do controlador em 96%, a carga em corrente contínua da bateria será calculada pela equação:

$$\text{carga bat. em CC (Wh/d)} = \frac{\text{dem. carga em CA}}{\eta_{inv.} * \eta_{cont.}} \quad (14)$$

onde a carga da bateria em corrente contínua é relação entre a demanda de carga em corrente alternada para a casa e as eficiências do inversor e controlador. Para transformar esse valor em amperes-horas de capacidade da bateria, precisa-se escolher um sistema de voltagem. Como se utiliza uma voltagem de 220V na região, esse valor foi adotado. Considerando os principais

dispositivos da casa sendo ligados ao mesmo tempo, obtém-se a demanda de energia necessitada e segundo Masters (2013c), encontra-se o sistema de voltagem que se utilizará as baterias. Com isso, determina-se a carga que as baterias iram fornecer pela seguinte fórmula:

$$\text{carga (Ah/d)} = \frac{\text{carga bat.em CC}}{V_{\text{sist.}}} \quad (15)$$

Para se obter uma saída relativamente uniforme durante todo o ano, escolhera-se coletores voltados para o norte, com ângulo igual a latitude menos 15 (L -15). Da Tabela 2, o mês com o mínimo de insolação é julho. Logo, da seguinte equação obtida de Masters (2013d), determina-se o armazenamento necessário para suprir a demanda em 95% do tempo. Portanto, o armazenamento que precisamos é dado por:

$$\text{armaz.} = \text{carga (Ah/d)} * \text{n}^\circ \text{ dias} \quad (16)$$

Selecionando-se baterias de descarga profunda de chumbo-ácido, tem-se de certeza que elas podem ser descarregadas rotineiramente em 80%. Como a mínima temperatura na região de Teresina-PI nunca chega a menos de 10°C, pode-se ignorar quaisquer inconvenientes com congelamento que possa afetar.

Baterias são nominalmente classificadas em C / 20 e 25°C. De acordo com Masters (2013e), a uma temperatura de 10°C e a uma taxa de C / 75, acha-se a relação da capacidade de armazenamento em função da capacidade nominal. Aplicando-se o fator de 0,8 para a descarga máxima e o fator encontrado da relação acima para a taxa de descarga e temperatura, temos:

$$\text{cap. nominal (C/20, 25°C)} = \frac{\text{armz.}}{\text{MDOD} * (\text{TDR})} \quad (17)$$

onde MDOD é a profundidade máxima de descarga (padrão = 0,8 para chumbo-ácido) e TDR é fator de temperatura e taxa de descarga. A partir disso, Masters (2013f) facilita a escolha da bateria e sua disposição em cadeias, como mostrado na Figura 1.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Insolação total e quantidade de energias

Com base nas equações apresentadas e assumindo os efeitos de sombreamento devido às nuvens como inclusas nos dados de um típico ano meteorológico (TMY), foi determinada a insolação total, com valor máximo de 8,39 kWh/m²/d para o mês de agosto e mínimo de 6,15 kWh/m²/d para o mês de julho. Além da quantidade de energia produzida, consumida e que sobrar, com os valores máximos de 10,03 kWh/d para outubro, 8,7 kWh/d para fevereiro e 2,2 kWh/d para outubro, respectivamente. A quantidade total de energia necessária ($E_{neces.}$) para suprir a casa é de 202,99 kWh/mês. É importante, entretanto, incluir um coeficiente de segurança de 20% para o caso de variações inesperadas. Portanto, a quantidade resultante é igual a 243,59 kWh/mês ou 2923,06 kWh/ano.

3.2. Módulos fotovoltaicos (PV's)

Utilizando-se os dados de desempenho obtidos dos fabricantes para os módulos e inversores, foi dimensionado o sistema fotovoltaico (PV). Obteve-se o valor de 61,8°C para a temperatura da célula do módulo (T_{cell}) e conseqüentemente foi determinado o valor de 0,83 para o fator de correção devido à temperatura ($FC_{temp.}$). A partir do valor da insolação para o menor valor de pico de sol no módulo, da quantidade de dias em um ano (365 dias), do $FC_{temp.}$ e da $E_{necess.}$, calculou-se a potência em corrente contínua e encontrou-se o valor de 1,57 kW.

Usando as condições de testes padrão (STC), os módulos PV's precisam entregar 1,57 kW, portanto a partir da eficiência do módulo η e levando-se em consideração um dia de sol completo (1 kW/m²), determinou-se a área de módulo necessária, que é de 11,72 m². Com os valores da potência em DC e a máxima potência de pico do módulo, que vale 240 W ou 0,24 kW, encontrou-se o número de módulos igual a 6,54. Entretanto, antes de decidir entre 6 ou 7 módulos teve de se levar em consideração o número de módulos por cadeia. A tensão de rastreamento do ponto de potência máximo (MPP) do inversor varia em uma faixa de 200 a 400 V e a tensão nominal do módulo $V_{oc} = 32.2V$, relacionando-se obteve os valores de 6,21 e 12,42 módulos por cadeia. Para que se tivesse um valor exato, foi verificada a influência da mudança de temperatura na quantidade final de módulos por cadeia.

Para o dia mais frio, considerando a temperatura de 22°C e a tensão de rastreamento de 400 V, obteve uma tensão V_{oc} de 32,63V e o equivalente a menos de 12,26 módulos por cadeia. E para o dia mais quente, considerando a temperatura de 40°C e a tensão de rastreamento de 200 V, encontrou-se a temperatura de célula do módulo igual a 72,5°C, obteve-se uma tensão V_{oc} de 31,84V e o equivalente a pelo menos 6 módulos por cadeia. Um valor entre 6 e 12 módulos por cadeia satisfaz todas as restrições do inversor. Através da equação (13) e resultados mostrados na Tabela 2, foi simulada a quantidade de energia produzida com 6 e 7 módulos no

sistema. Usando 7 módulos, a quantidade de energia produzida seria excessiva comparada com a necessitada, e com 6 módulos, o sistema supriria com energia suficiente para todos os meses, com exceção de julho, onde seriam produzidos 500 kWh/d menos do que o necessário. Portanto, foi decidido por utilizar-se 6 módulos por cadeia.

3.3. Baterias

No dimensionamento das baterias, através da literatura, foi decidido utilizar baterias que dessem uma disponibilidade de 95% de energia ao sistema. Utilizando-se dados dos inversores e estimando uma eficiência de 96% para o controlador, determinou-se a carga em corrente contínua que as baterias iriam ser capaz de armazenar, que foi equivalente a 9803,92 Wh/d. Como a tensão do sistema é igual a 220V, e a partir do valor de 4,21 kW de energia consumida, considerando-se os principais dispositivos ligados ao mesmo tempo, foi determinado que o sistema teria uma tensão igual a 48V, segundo Masters (2013g) para que mantivesse uma corrente abaixo de 100 A. E utilizando-se a equação (15), as baterias precisariam suprir uma carga de 204,25 Ah/d a 48V.

Feitas as considerações onde os coletores estariam voltados para o norte e teria um ângulo de latitude L-15, pode-se perceber da literatura que 2 dias de capacidade de armazenagem seria suficiente para cobrir 95% do tempo. E, portanto, verificou-se através da equação (16) que o armazenamento seria de 408,5 Ah a 48V. Após a escolha pela bateria de chumbo-ácido que garante uma profundidade máxima de descarga (MDOD) de 80%, Masters (2013h) sugeriu que a capacidade de armazenamento seria em torno de 1,08 vezes maior do que a capacidade nominal. Ao aplicar-se o fator de 0,8 para a descarga máxima, encontrou-se portanto, uma capacidade nominal equivalente a 472,4 Ah a 48V. Logo, para uma boa aproximação da necessidade energética deste projeto, resolveu-se por utilizar baterias Fullriver DC260-12, dispostas em duas cadeias com 8 baterias de 12V.

3.4. Custos

Chegou-se a conclusão, após os cálculos, que o custo do sistema fotovoltaico, sem considerar os custos mínimos com instalações e fios, ficaria em torno de US\$ 9156,92 dólares. Torna-se uma alternativa viável se comparada com os custos para fazer energia elétrica alcançar pequenas comunidades isoladas e distantes das instalações elétricas de cidades próximas. Fazendo-se uma simulação para uma vila distante 10 km da cidade, chegou-se a uma conclusão de que seriam necessários pelo menos US\$ 18453,99 dólares de investimento por casa. Vale ressaltar que com o sistema fotovoltaico não haverá custos mensais como o que ocorre utilizando-se o fornecimento de energia elétrica por companhias. Além de que para grandes comunidades, o custo para instalar sistema fotovoltaico pode ser reduzido significativamente, uma vez que poderá utilizar-se a mesma planta, fazendo-se necessárias somente algumas alterações.

5. CONCLUSÃO

Atualmente ainda existem muitos lugares que não são alcançados por distribuidoras de energia elétrica, e sistemas de energia solares surgem como uma alternativa muito viável em longo prazo. Neste projeto, um sistema de geração de energia fotovoltaica que possua uma execução viável comparada com a utilização de energia elétrica para uma simples foi simulado; onde se utilizou dados da irradiação solar para a região e de módulos solares e inversores, através de equações obtidas da literatura.

Os valores obtidos levando-se em consideração muitos fatores, como o fator de correção, a energia em corrente contínua, as áreas totais requeridas foram expostas e mostradas em tabelas. O dimensionamento do arranjo ficou dentro do esperado, onde alcançou valores de energia superiores à média desejada, com exceção do mês de julho. Uma forma de resolver esse problema seria diminuindo o fator de segurança de 20% para 12% somente para este mês. E, portanto, teria uma quantidade de energia suficiente e com um custo de produção reduzido.

Os resultados mostram que a implantação de sistemas solares em áreas isoladas do estado do Piauí é considerada cara, entretanto viável em médio ou longo prazo se comparado com os gastos com instalação e utilização de energia elétrica produzida e distribuída na região, onde seu uso demandaria a instalação de muitos quilômetros de fios e postes para se fazer as conexões, estes considerados caros. Outro problema a se considerar seria a qualidade da energia recebida, haja vista que a mesma não é tão boa dentro da própria cidade. Entretanto, considerando-se que as células solares utilizadas neste projeto têm uma garantia de 25 anos, o sistema terá pelo menos uma vida útil de 20 anos; que para pequenas comunidades, será energia suficiente para um longo tempo.

6. REFERÊNCIAS

ANEEL. **Banco de Informações da Geração**. 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 15 de abril de 2020.

Bassam, N. E. **Renewable energies for rural communities**. Renewable Energy 2001; 24: 401–408.

Cepel. **Centro de Pesquisas de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/sundata/>>. Acesso em: 18 de abril de 2020.

Clima: Teresina. **Média da máxima temperatura ambiente do ano**. Disponível em: <<http://pt.climate-data.org/location/3935/>>. Acesso em: 22 de abril de 2020.

Gordon, J. M., Rabl. A. **Design, analysis and optimization of solar industrial process heat plants without storage**. Solar Energy 1982; 28 (6): 519-530.

Gordon, J. M., Wenger, H. J. **Central-station solar photovoltaic systems: field layout, tracker, and array geometry sensitivity studies**. Solar Energy 1991; 46 (4): 211-217.

Hankins, M. **Solar Electric Energy Systems for Africa, A guide for Planning and Installing Solar Electric Systems in Rural Africa**. Commonwealth Science Council 1995, London and AGROTEC, Harare, Zimbabwe.

IEA, **International Energy Agency**, 2009. World Energy Outlook.

INPE. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**. Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/>. Acesso em: 20 de abril de 2020.

Masters, G. **Renewable and efficient electric power systems**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013.

Capítulo 06

IMPORTÂNCIA DA METROLOGIA NA FORMAÇÃO DO ENGENHEIRO MECÂNICO

WÊNIO FHARÁ ALENCAR BORGES¹, ANDRÉ SALES AGUIAR FURTADO², FILIPI MACIEL DE MELO³, IGOR ANTONIO DE OLIVEIRA CARVALHO⁴

RESUMO

O trabalho proposto tem por finalidade discutir a importância da Metrologia, seu desenvolvimento e aplicações nos cursos de ciências exatas, com foco especial na Engenharia Mecânica. O estudo de caso em questão busca contemplar os fatores que influenciam nas medições e as relações que estas têm no projeto e design de elementos mecânicos. Sua atuação regulamenta e padroniza os processos produtivos com foco na confiabilidade, credibilidade, universalidade e qualidade às medidas, de maneira a garantir a característica dos produtos e serviços. A partir dessa análise, entende-se como e porque a metrologia atua nas situações cotidianas, agindo direta e indiretamente nos parâmetros e tomadas de decisões, de modo que tenhamos processos de alta precisão e a elaboração de elementos que possam trabalhar de forma sincronizada.

Palavras-Chave: Metrologia, medições, engenharia mecânica

1. INTRODUÇÃO

Definida pela ciência de medidas e medições (INMETRO, 2008), a metrologia apresenta papel fundamental nas atividades desempenhadas cotidianamente. Essa ciência está presente em todos os processos teóricos e práticos que exigem medição.

Desde a história da antiguidade, o homem já utilizava padrões de medições para a manufatura de suas construções e equipamentos. As primeiras medições utilizadas pelo homem, referiam-se a partes do corpo humano. Em geral, tomadas como padrões as medidas do corpo do rei. Daí surgiram os termos, o palmo, o pé, a polegada, o passo, a jarda, que era a distância do nariz ao polegar do rei, 'o côvado', que era distância de três palmos, e aparece até no antigo testamento na construção da arca de Noé, 'e o cúbito', que é um osso do antebraço e era utilizado pelos egípcios. Porém, os reinos possuíam reis diferentes, e assim medidas padrões diferentes. Os egípcios, no entanto, percebendo essa distorção, estabeleceram a primeira forma de calibração conhecida, eles desenvolveram uma placa feita primeiramente em pedra, e

¹Mestre em Engenharia Mecânica (UFPE), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Pedreiras, Pedreiras-MA.

E-mail: wenio.borges@ifma.edu.br

²Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais (UFPI), Universidade Federal do Piauí – UFPI, Teresina-PI.

E-mail: salesandre7@gmail.com

³Mestre em Engenharia Mecânica (UFPB), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Timon, Timon-MA.

E-mail: filipi.melo@ifma.edu.br

⁴Mestre em Engenharia de Materiais (IFPI), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Timon, Timon-MA.

E-mail: igor.carvalho@ifma.edu.br

posteriormente em madeira, para facilitar o transporte, que era fixada na entrada dos principais tempos da época e serviam como referencial padrão para as medições.

Para unificar os padrões de medidas, servindo de referencial universal, em 1960 através da Conferência Geral de Pesos e Medidas foi criado o Sistema Internacional de Unidades ou SI, o sistema é baseado em sete unidades de base. A Tabela 1 descreve as unidades base do SI.

No Brasil, o Sistema Internacional de Unidades foi adotado em 1962 através da resolução nº 12 de 1988 do Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - CONMETRO, o mesmo ratificou a adoção do SI no País e tornou seu uso obrigatório em todo o território nacional (INMETRO, 2006).

Para medições de equipamentos mecânicos, a grandeza mais utilizada é o comprimento, sendo este regido pela unidade de metro, que é a distância percorrida pela luz no vácuo no intervalo de tempo de um dividido por 299.792.458 segundo (INMETRO, 2013).

Paralelamente ao metro, existem outras unidades conhecidas como múltiplas, que não fazem parte do sistema internacional de medidas, mas que podem ser convertidas através de relações matemáticas na unidade padrão, no caso o metro. Dentre elas podemos citar, centímetro, milímetro, polegada e polegada fracionaria. Todas essas medidas são 'frações' de unidades de comprimento e possuem extrema importância nas medições.

Tabela 1. Unidades base do SI

| Grandeza | Unidade SI | |
|---------------------------|------------|---------|
| | Nome | Símbolo |
| Comprimento | metro | m |
| Massa | quilograma | kg |
| Tempo | segundo | s |
| Corrente Elétrica | ampère | A |
| Temperatura Termodinâmica | Kelvin | K |
| Intensidade Luminosa | candela | cd |
| Quantidade de Matéria | mol | mol |

Com a revolução industrial, e as inovações tecnológicas, os equipamentos e processos foram sendo modernizados e exigiu-se assim maiores precisões e processos padrões. Um exemplo, ao qual podemos citar é a indústria automobilística, em que os produtos são produzidos em massa, e uma variação nos padrões na fabricação desses produtos, que obedecem à uma série de procedimentos e exigências, causaria um enorme prejuízo à empresa.

A partir disto, percebe-se a importância da metrologia e de como os seus métodos devem obedecer às regras normativas que padronizam os processos. As medidas e medições também servem de maneira comparativa entre projetos e trabalhos, entender quais as relações e possíveis erros associados a medições realizadas.

Na engenharia mecânica, a confecção e elaboração de processos e equipamentos mecânicos, se faz imprescindível o uso dessa ciência. A garantia de precisão e a certificação de padrões fazem parte do processo produtivo e industrial. Portanto, este trabalho busca discorrer a

importância e a aplicabilidade da metrologia na área das ciências exatas. Serão discutidas seus métodos, erros associados e as consequências que essas medidas podem trazer.

2. METODOLOGIA

Quanto aos procedimentos técnicos aplica-se ao trabalho a pesquisa bibliográfica que segundo (Gil,1991, p. 48) é desenvolvida a partir de material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos.

A pesquisa bibliográfica é um processo minucioso, que requer dedicação e tempo, pois revisa as teorias que embasam o estudo, busca a resolução de problemas e discute suas contribuições. Com isso proporciona um melhor aprendizado numa determinada área, facilita a difusão do conhecimento ao embasar novos estudos ou ao guiar certas práticas. O trabalho tem como objetivo obter conhecimento das regras, instrumentos e métodos utilizados sobre o tema relacionado. Adicionalmente, será comentado um caso prático em uma instituição de ensino pública brasileira, localizada na cidade de Teresina- PI, afim de exemplificar e demonstrar a importância dos parâmetros utilizados pela metrologia, fazendo um comparativo da literatura com a prática.

Para o estudo em caso foram coletados dados do INMETRO, Instituto Nacional de Metrologia, e outras instituições associadas ao referido tema para análise e discussão de como a ciência é correlacionada a áreas do conhecimento, em especial a engenharia mecânica. O objetivo deste trabalho visa demonstrar a importância desta ciência, e como ela afeta os processos produtivos teóricos e práticos.

3. O USO DA METROLOGIA NO BRASIL

O ensino e uso da metrologia no Brasil ainda ocupa papel secundário. Nas instituições de ensino, dentre elas as de engenharias, o ensino da metrologia não é enfatizado, sendo constantemente substituída pela aplicação de outras ciências correlacionadas, como a matemática e a física. Tal evidência é notável quando se observa o número de publicações e teses defendidas, segundo a CAPES, das áreas de Metrologia comparadas às áreas de Matemática e Física.

Outro tema constante, é que a disciplina de Metrologia é ofertada como uma ciência, de fato, em poucas instituições. A mesma é correlacionada a outros temas como normatização ou noções básicas de medição, sem que ocorra uma relação com disciplinas profissionalizantes (Bernardes et al, 2010). Com base nesses fatos, podemos perceber a carência da cultura metrológica no meio acadêmico e a necessidade de reformas.

Parte desse argumento, justifica-se pelo fato de que a indústria e os setores produtivos se atêm mais a métodos de inovação e melhoramento, do que a 'regra' propriamente dita. Como

resultado dessa carência, o setor industrial não consegue absorver a quantidade de profissionais pós-graduados devido à falta de valorização da parte 'técnica'.

O uso de procedimentos e métodos que garantam a precisão de medições, estão diretamente associados a qualidade de um produto ou serviço produzido. A ciência das medições está correlacionada à normalização e avaliação da conformidade, dessa maneira garante meios de inovação tecnológica e o desenvolvimento do setor industrial. O uso da metrologia, dentro das empresas e dos processos produtivos, vai muito além do que uma obrigação.

4. INMETRO

Autorquia federal brasileira que atua como Secretaria Executiva do Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Conmetro), que é o órgão normativo do Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Sinmetro).

4.1. Erros de medição

Mesmo que as medidas requeridas em um processo necessitem ser extremamente precisas, a metrologia sempre permite que tenhamos limites toleráveis para tais medições. E que alguns erros de medição podem ocorrer de forma direta ou indireta, dentre os principais erros de medição podemos citar:

- Temperatura: a temperatura padrão para as medições é de 20°C. As medições realizadas acima ou abaixo dessa temperatura padrão, podem ocasionar a dilatação do material, acima, ou a contração do material, abaixo, gerando assim erros.
- Maneira de contato para medições: utiliza-se a maior área de contato possível dos instrumentos, e sempre os posicionando corretamente de acordo com a visão do operador para evitar também, erros de leituras, conhecido como erro de paralaxe.
- Força utilizada na medição: não é recomendável a aplicação de muita força no momento das medições, os instrumentos de medição, geralmente, são sensíveis a esforços, e as leituras podem ser alteradas ou o material ser danificado.

Também devemos estar atentos ao estado de conservação dos equipamentos a serem medidos, de maneira que as folgas e os desgastes não influenciem nas medições realizadas. A importância de se considerar esses evitar erros no processo de medição torna com que eleve a qualidade no processo de medição assim como a confiabilidade dos resultados obtidos.

5. A METROLOGIA AUXILIANDO NA ENGENHARIA MECÂNICA

Para os cursos de engenharia, dentre eles, o curso de engenharia mecânica, o aperfeiçoamento dos conhecimentos na área se faz indispensável para os processos produtivos.

O engenheiro é o profissional de engenharia, preocupado com a aplicação do conhecimento científico, matemático e criativo a fim de se desenvolver soluções para problemas técnicos (Oxford, 2010). Do engenheiro também é requerido a interdisciplinaridade de conhecimentos e a capacidade de transformar questões em respostas de maneira eficiente e organizada.

A metrologia auxilia, assim como no campo das ciências exatas, a garantia dos procedimentos padrões para a realização de qualquer processo com o grau de qualidade e exatidão ansiado por consumidores e fabricantes. Através dela, desenvolveu-se instrumentos de medição com precisões altíssimas, equipamentos estes que possibilitaram o desenvolvimento de novas técnicas e a confecção de novos produtos. Podemos citar como exemplo, a produção de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos. Para a confecção deste elemento mecânico, a medição e utilização das medidas de maneira exata se faz imprescindível. Qualquer erro que seja, terá influência direta no desempenho e funcionamento da engrenagem. Haja visto, essa ferramenta necessita um encaixe 'perfeito', para que os dentes estejam alinhados e sincronizados no seu funcionamento.

6. TIPOS DE EQUIPAMENTOS DE METROLOGIA UTILIZADOS NA ENGENHARIA MECÂNICA

A escolha dos instrumentos de medições utilizados em qualquer processo deve obedecer a fatores que incluem desde o princípio de funcionamento, suas aplicações até ao campo de tolerância que o objeto pode ter.

São vários os equipamentos de metrologia utilizados na engenharia mecânica, mas para os processos de confecção de instrumentos os principais usados referem-se à grandeza de comprimento. A Figura 1 ilustra alguns desses instrumentos, dentre os quais destacamos:

1. Régua: é um instrumento com pouca precisão em que lemos os números inteiros e estimamos as casas decimais.
2. Paquímetro: instrumento mais preciso do que a régua, é um dos mais utilizados na indústria, pois com ele é possível atingirmos precisão de centésimos de mm.
3. Traçador de altura: instrumento semelhante ao paquímetro, além de medir, é possível fazer as marcações.
4. Micrômetro: é um instrumento de medição com uma precisão maior do que o paquímetro, pode medir peças com medidas milésimas.
5. Goniômetro ou transferidor: é um instrumento utilizado para medição de ângulos.
6. Relógio comparador: um instrumento de medição que utiliza o método da comparação para efetuar suas medidas.



Figura 1. Equipamentos de Medição.

Fonte: Autoria própria.

Além dos instrumentos citados acima, podemos utilizar alguns calibradores para conferência de medidas, como o verificador de raio, os blocos padrões, entre outros.

7. CONCLUSÕES

Através do estudo realizado sobre a ciência das medições, podemos afirmar que sua atuação regulamenta e padroniza os processos produtivos de maneira a garantir a qualidade dos produtos e serviços.

Além disso, percebemos a necessidade da intensificação dos esforços para tornar a metrologia, mais do que uma obrigação, que possamos implementá-la nas empresas a fim de garantir métodos precisos, inovadores e seguros.

É necessário qualificar os profissionais, engenheiros, técnicos e todas as pessoas envolvidas nos processos produtivos de maneira a utilizar a metrologia não como uma ciência alternativa, mas com conhecimentos particulares e específicos.

Atrelado a isso, a fomentação ao desenvolvimento de trabalhos e teses sobre a metrologia é indispensável, ainda mais na área das ciências exatas, dentre elas, a engenharia mecânica.

O engenheiro mecânico, analisa quesitos técnicos e desenvolve processos que atendem a regulamentações e normas de avaliação de conformidade. O mesmo deve possuir domínio e prática, estando apto para desenvolver atividades que garantam a segurança e qualidade dos produtos e serviços.

Com relação ao ensino, os cursos de metrologia devem capacitar os profissionais para a utilização de maneira correta dos equipamentos de medição, seu uso e o conhecimento necessário de cada instrumento. Registrar, interpretar e utilizar os dados das medições, bem como, analisar todas as condições que possam interferir ou não nos procedimentos de medição. Na parte técnica e normativa, é sugerido que as instituições responsáveis pela certificação dos padrões de medida, promovam o incentivo e a fomentação às práticas nas universidades e cursos técnicos em áreas que se correlacionem com a metrologia.

Por fim, ao final desse estudo é possível reafirmar a metrologia como ciência indispensável no âmbito técnico e teórico. Seus métodos, instrumentos e normas garantem, não só a Engenharia Mecânica, como a quase todas as áreas, processos produtivos seguros, com qualidade e inovação.

8. REFERÊNCIAS

BERNARDES, A. T. **A metrologia e a avaliação da conformidade no Ensino de engenharia: uma proposta do INMETRO**. COBENGE 2010 - Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia. 2010.

DASILVA NETO, João Cirilo. **Contribuições da Metrologia em cursos de Engenharia**. COBENGE 2011 – Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia. "engineer". Oxford Dictionaries. April 2010. Oxford Dictionaries. April 2010. Oxford University Press. 2011.

GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. São Paulo: Atlas, 1991.

INMETRO, 2013. **Portaria nº 590, de 02 de dezembro de 2013**. Acesso em 18 de maio de 2020. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002050.pdf>>

____.INMETRO, 2008. **Portaria nº 285, de 11 de agosto de 2008**. Acesso em 30 de maio de 2020. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001358.pdf>

____.INMETRO, 2006. **Portaria nº 285, de 11 de dezembro de 2006**. Acesso em 30 de maio de 2020. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001079.pdf>

____.INMETRO, **Metrologia Científica** [Internet]. Acesso em 13 de maio 2020. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/metcientifica/>

SENAI EAD ES, **Metrologia**. [Modulo Teórico]. Acesso em 14 de maio de 2020.

Capítulo 07

CARACTERIZAÇÃO E DESEMPENHO DO AÇO AISI M2 APÓS APLICAÇÃO DA NITRETAÇÃO POR PLASMA VISANDO APLICAÇÕES EM FERRAMENTAS DE CONFORMAÇÃO

LUIZ HENRIQUE PORTELA DE ABREU¹, WÊNIO FHARÁ ALENCAR BORGES², RÔMULO RIBEIRO MAGALHÃES DE SOUSA³, ANDRÉ SALES AGUIAR FURTADO⁴, FILIPI MACIEL DE MELO⁵, IGOR ANTONIO DE OLIVEIRA CARVALHO⁶

RESUMO

No âmbito da indústria metalúrgica, a nitretação por plasma é um tratamento termoquímico de superfície utilizado quando se deseja melhorar propriedades superficiais específicas de materiais metálicos, como dureza, resistência ao desgaste e à corrosão. Isto ocorre através da difusão e reação entre nitrogênio e elementos de liga na superfície do material e visa obter propriedades adequadas à sua aplicação, bem como o aumento da sua vida útil. Amostras e ferramentas de conformação confeccionadas de aço rápido AISI M2 foram tratadas a 400°C, 450°C e 500°C pelos processos de nitretação por plasma e em gaiola catódica com o objetivo de comparar o desempenho da camada nitretada em ferramentas de conformação utilizadas na fabricação de pregos para a construção civil. As amostras tratadas foram avaliadas por ensaio de microdureza Vickers e pelas técnicas de caracterização de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difração de Raios-X (DRX), já as ferramentas de conformação foram submetidas às suas condições usuais de trabalho para análise de desempenho quanto à sua produtividade. De acordo com os resultados, a temperatura de tratamento a qual obteve-se maior aumento de microdureza superficial, em torno de 280% da amostra não tratada, tanto para a nitretação por plasma convencional como em gaiola catódica, foi a 400°C. Quanto à espessura da camada de compostos, esta possuiu maior valor na temperatura de 500°C, de acordo com os perfis de microdureza apresentados. A partir da análise de desempenho das ferramentas de conformação nitretadas, a temperatura de tratamento a qual obteve-se maior aumento de produtividade, em torno de 730% da ferramenta de fábrica, tanto para a nitretação a plasma convencional como em gaiola catódica, foi a 500°C. Destaque para a eficiência da nitretação por plasma em gaiola catódica, onde foi obtido um aumento de produtividade cerca de 20% maior em comparação à nitretação por plasma, nas mesmas condições de tratamento.

Palavras-Chave: Nitretação por plasma, ferramenta de conformação, gaiola catódica.

¹Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais (UFPI), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM, Campus Manaus Distrito Industrial, Manaus-AM.

E-mail: luizhabreu92@gmail.com

²Mestre em Engenharia Mecânica (UFPE), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Pedreiras, Pedreiras-MA.

E-mail: wenio.borges@ifma.edu.br

³Doutor em Ciência e Engenharia dos Materiais (URFN), Universidade Federal do Piauí – UFPI, Teresina-PI.

E-mail: romulorms@gmail.com

⁴Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais (UFPI), Universidade Federal do Piauí – UFPI, Teresina-PI.

E-mail: salesandre7@gmail.com

⁵Mestre em Engenharia Mecânica (UFPB), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Timon, Timon-MA.

E-mail: filipi.melo@ifma.edu.br

⁶Mestre em Engenharia de Materiais (IFPI), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Timon, Timon-MA.

E-mail: igor.carvalho@ifma.edu.br

1. INTRODUÇÃO

Na indústria metalúrgica, as ferramentas de conformação responsáveis pela fabricação de pregos para a construção civil são usualmente submetidas a condições de trabalho não lubrificadas, onde sua vida útil é limitada pelo desgaste superficial, que altera sua geometria, comprometendo a qualidade final do produto. Destas ferramentas, são exigidas algumas qualidades específicas, como alta dureza, tenacidade e capacidade de conservar suas propriedades mecânicas à variação de temperatura (HACISALIHOGU et al., 2017).

Os tratamentos superficiais têm sido fundamentais para melhorias no desempenho dos aços utilizados na fabricação de ferramentas utilizadas na indústria metalomecânica. Entre estes, a nitretação é um método comprovado para aumentar a resistência dos aços à deformação plástica, fadiga e desgaste (ROUSSEAU et al., 2015).

Dentre os processos de nitretação, a nitretação por plasma é uma opção de tratamento para melhoria das propriedades superficiais de aços ferramenta. Como vantagens, em relação aos processos convencionais de nitretação (nitretação a gás e banho de sais), tem-se a economia de energia, devido a necessidade de temperaturas de trabalho relativamente menores, menor tempo efetivo de tratamento e ser ambientalmente limpo (ALVES JR et al., 2006).

Os componentes a serem tratados são submetidos a um alto potencial catódico para produzir plasma diretamente nas suas superfícies. Como consequência, distorções do campo elétrico em torno dos cantos e bordas dos componentes provocam “efeito de borda”, efeito caracterizado pela não-uniformidade em propriedades como a dureza e a espessura da camada superficial que podem comprometer sua aplicação (NISHIMOTO et al., 2013).

Uma modificação da nitretação por plasma, denominada nitretação por plasma em tela ativa, substitui a região de descarga luminescente do componente a ser tratado por uma tela metálica separada adicionalmente introduzida, a tela ativa, que envolve os componentes a serem tratados, eliminando as desvantagens da nitretação por plasma causada pela influência direta da energia de descarga na superfície dos componentes a serem tratados (HAMANN et al., 2015).

Com base no processo de nitretação por plasma de tela ativa, um novo dispositivo chamado gaiola catódica ou gaiola ionizante (patente PI0603213-3), foi desenvolvido no LABPLASMA - UFRN, dando início ao uso da técnica de nitretação iônica em gaiola catódica. No processo de nitretação iônica em gaiola catódica, os componentes a serem tratados são mantidos sobre uma placa isolante posicionada no interior de uma tela de metal conhecida como gaiola catódica. O mecanismo da gaiola catódica baseia-se na pulverização catódica e redeposição do material de fabricação da gaiola, o que sugere que os elementos formadores de nitreto podem ser depositados de acordo com o seu material. Esta técnica já foi utilizada anteriormente para a deposição de vários materiais, incluindo cobre, prata e nióbio, dependendo do resultado desejado (NAEEM et al., 2017).

Este trabalho se justifica pela análise de parâmetros de nitretação por plasma em gaiola catódica que poderão ser utilizados para aplicação no aço AISI M2, bem como servir como

referência para análises de aplicação em outros aços rápidos. Além disso, a grande maioria dos trabalhos publicados utilizam somente a nitretação por plasma ao aço AISI M2 e poucas são as informações disponíveis sobre a aplicação da nitretação iônica em gaiola catódica neste tipo de aço (ROUSSEAU et. al., 2015; MOHAMMADZADEH et al. 2014).

O objetivo deste trabalho é analisar a morfologia, composição e propriedades das amostras de aço AISI M2 tratadas por plasma através dos processos de nitretação convencional e em gaiola catódica, bem como comparar o desempenho de ferramentas de conformação confeccionadas de aço AISI M2 tratadas por plasma através do processo de nitretação convencional e em gaiola catódica, nas mesmas condições de tratamento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado nesse estudo foi o aço rápido AISI M2, fornecido pela Villares Metals, no estado recozido, com dureza aproximada de 260 HV, com a seguinte composição (% em peso): 0,89% C; 1,8% V; 4,2% Cr; 6,2% W; 4,9% Mo; 82,01% Fe. As amostras de aço AISI M2 foram obtidas no formato de bloco retangular com 20 mm de comprimento, 10 mm de largura e 10 mm de altura, lixadas em politriz com lixas de granulometria 320, 400, 600 e 1200 mesh e polidas em disco de feltro com alumina. As ferramentas de conformação fabricadas de aço AISI M2, tratadas por têmpera, tratamento subzero e nitretação em banho de sais, com dureza inicial de 750 HV, e recondicionadas, sem tratamento térmico ou termoquímico, com dureza inicial de 260 HV, foram fornecidas por uma empresa que fabrica pregos para a construção civil.

Por apresentarem superfície retificada, as ferramentas foram lixadas na superfície de trabalho a partir da lixa de granulometria 600 mesh seguido por 1200 mesh. Após isso, foram lavadas com água e álcool, secadas e armazenadas com proteção de vaselina líquida.

Para este trabalho, foram confeccionadas duas gaiolas catódicas, uma para a nitretação em gaiola catódica das amostras, com diâmetro de 40 mm, altura de 20 mm e furos de 8 mm de diâmetro, e outra para a nitretação em gaiola catódica das ferramentas, com diâmetro de 40 mm, altura de 100 mm e furos de 8 mm de diâmetro. No tratamento, as amostras ou ferramentas são postas no interior da gaiola sobre um disco isolante de alumina com 20 mm de diâmetro e 3 mm de espessura. Nesta configuração, o plasma não se formará em sua superfície e sim na superfície da gaiola.

A Figura 1, de autoria própria, mostra o posicionamento e a vista em corte do conjunto composto por: amostra, gaiola e alumina, bem como sua disposição no interior de um reator pertencente ao Laboratório de Plasma da UFPI confeccionado de aço inoxidável, com 30 cm de diâmetro e 40 cm de altura, cuja fonte de tensão é pulsada, de voltagem e corrente máximas de 1200 V e 2 A, respectivamente, além de possuir uma resistência elétrica no interior para aquecimento auxiliar.

Anteriormente a todos os processos de nitretação realizados neste trabalho, as amostras e ferramentas foram limpas em um equipamento de limpeza por ultrassom em meio líquido de

acetona durante um intervalo de tempo de 15 min, secas e introduzidas no reator de plasma de corrente alternada, conforme o tipo de processo. Um pré-sputtering, pré-tratamento para remoção de óxidos e contaminações da superfície do componente a ser nitretado, foi realizado a 350 °C, com uma atmosfera composta por 50% de Ar e 50% de H₂ a uma vazão total de 200 sccm e pressão de 150 Pa, com duração de 1 h. Após o pré-sputtering, as condições de nitretação foram aplicadas e o tratamento iniciado.

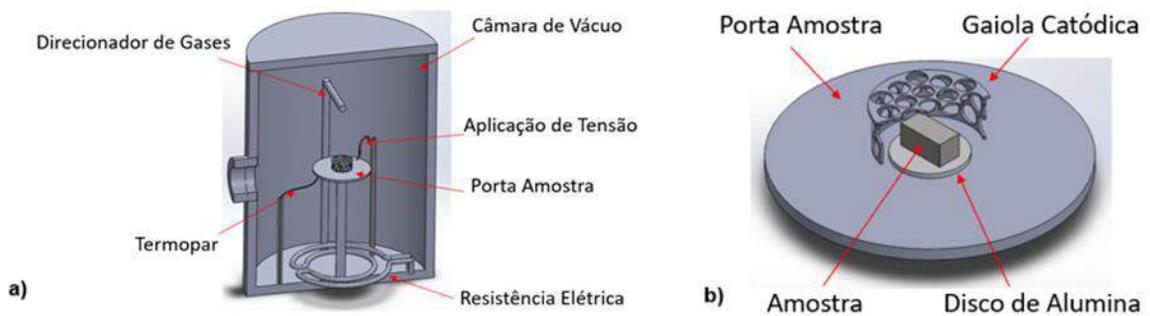


Figura 1. Esquema mostrando a) a montagem dos componentes no reator e b) a amostra isolada no interior da gaiola.

Fonte: Autoria própria.

Todos os tratamentos tiveram duração de 4 horas e pressão de 300 Pa. O parâmetro estudado foi a temperatura, onde foram realizados tratamentos a 400 °C, 450 °C, 500 °C. Para os tratamentos de nitretação por plasma, utilizou-se uma atmosfera nitretante composta por 75% de H₂ e 25% de N₂, a uma vazão total de 240 sccm. Nos tratamentos de nitretação iônica em gaiola catódica, a atmosfera foi composta por 75% de N₂ e 25% de H₂, a uma vazão total de 240 sccm.

As análises de Difração de Raios-X, para determinar as fases presentes na camada nitretada, foram realizadas em um difratômetro de Raios-X BRUKER (modelo D2 PHASER, radiação Cu-K α ($\lambda = 1.55418 \text{ \AA}$)), operando com tubo de alvo de cobre a uma tensão de 30,0 kV e 10,0 mA de corrente, ângulo de varredura (2θ) de 30° a 70° com passo angular de 0,02°. Para a identificação das fases, utilizou-se o software de identificação HighScore. A análise do incremento na microdureza das amostras, tanto na superfície como na seção transversal, foi realizada no padrão Vickers. O equipamento utilizado para realização das microdurezas foi um microdurômetro da marca Shimadzu, modelo HMV 2000. A carga utilizada nos ensaios foi de 50 gf. Foram realizadas impressões distando 15 μm entre si.

Para a análise da microdureza superficial, foram feitas 10 impressões ao longo da superfície da amostra, enquanto que para a confecção do perfil de microdureza ao longo da camada nitretada, as amostras foram cortadas, lixadas com lixas d'água de granulometria: 200, 320, 400, 600 e 1200 mesh, embutidas em resina e as impressões foram feitas ao longo de sua seção transversal, num total de 8 impressões. A técnica de MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) foi utilizada para avaliar a morfologia da camada depositada, foram capturadas imagens na área da seção transversal da amostra a fim de mensurar a espessura da camada de compostos. Utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura modelo Quanta 250 FEG, da marca

FEI, localizado no Laboratório de Materiais Avançados (LIMAV), no centro de tecnologia (CT) da Universidade Federal do Piauí.

As ferramentas de conformação fabricadas de aço AISI M2, recondicionadas sem tratamento e nitretadas por plasma e em gaiola catódica, foram utilizadas em uma máquina da marca Vitari modelo V14 destinada à fabricação de pregos de construção civil. Esta máquina tem capacidade produtiva de 720 pregos por minuto, e trabalha com arames de aço SAE 1022 B, bitola de 2,41 mm, trefilado com dureza de 146 HV e limite de ruptura de 480 MPa.

No processo de fabricação de pregos, o arame é desbobinado, desempenado e guiado, por meio de guias e roletes, para o interior da máquina. Após o desempeno, e ainda no interior da máquina, o arame passa pelo setor de corte, onde um par de ferramentas de corte posicionado em sentido transversal ao arame irá seccioná-lo, dando o formato da ponta do prego em uma de suas extremidades. Em conjunto com a ferramenta de corte trabalha a ferramenta de conformação objetivo deste trabalho, que, posicionado em sentido longitudinal ao arame, martela e dá o formato da cabeça do prego na outra extremidade. Após isso, os pregos passam por um polimento para retirada de rebarbas e lustragem, depois, seguem para a máquina onde serão empacotados e armazenados.

Por motivo de padronização, as ferramentas de conformação, com seus respectivos tratamentos, destinaram-se exclusivamente à fabricação de pregos com dimensão de $1\frac{1}{4}$ "x13 (uma polegada e um quarto de comprimento e bitola BWG 13 (equivalente a 2,41 mm)) com massa de 1,235 g por unidade.

Para identificar o limite de uso das ferramentas, é feita uma inspeção visual periódica na ferramenta de conformação. A inspeção é feita avaliando-se o desgaste da geometria da ferramenta a partir da qualidade dos pregos produzidos, por exemplo, um prego com a cabeça mal conformada já é um indício de que o desgaste da punção está avançado e que a troca dela deve ser realizada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 2, pode-se observar o acréscimo na microdureza do aço ferramenta AISI M2 após a nitretação por plasma em todas as temperaturas de tratamento. Os valores obtidos evidenciam que, mesmo nos parâmetros de tratamento em que se obteve o menor acréscimo de microdureza, a 500 °C (amostra NC500), verificou-se um aumento de, aproximadamente, 257% em relação à microdureza do substrato. A temperatura a qual obteve-se a maior microdureza foi no tratamento a 400 °C (amostra NC400), cujo valor corresponde a um aumento de 296% em relação ao substrato. Esse aumento expressivo da microdureza superficial está associado à formação de uma camada de compostos com característica de dureza elevada produzida pela nitretação por plasma na superfície das amostras.

De acordo com a Figura 3, é possível observar, assim como nos resultados obtidos da

nitretação por plasma, a eficiência da nitretação em gaiola catódica, que mesmo nas condições de tratamento em que se obteve o menor acréscimo de microdureza, a 500 °C (amostra NGC500), um aumento de 246% em relação ao substrato foi observado. A temperatura a qual obteve-se o maior valor de microdureza foi no tratamento a 400 °C (amostra NGC400), cujo valor corresponde a um aumento de 278% em relação ao substrato. Além disso, vale destacar uma diminuição no valor médio da microdureza das amostras. Essa diminuição pode ser explicada pelo fato de que a nitretação por plasma em gaiola catódica, por não haver bombardeamento iônico diretamente na superfície da amostra e sim na superfície da gaiola, produziu uma camada de dureza e espessura uniforme, logo, a dispersão dos valores em torno da microdureza média foi menor. Este fato também pode ser observado através dos menores valores de desvio padrão para as amostras tratadas por nitretação iônica em gaiola catódica quando comparados aos valores das amostras tratadas por nitretação por plasma.

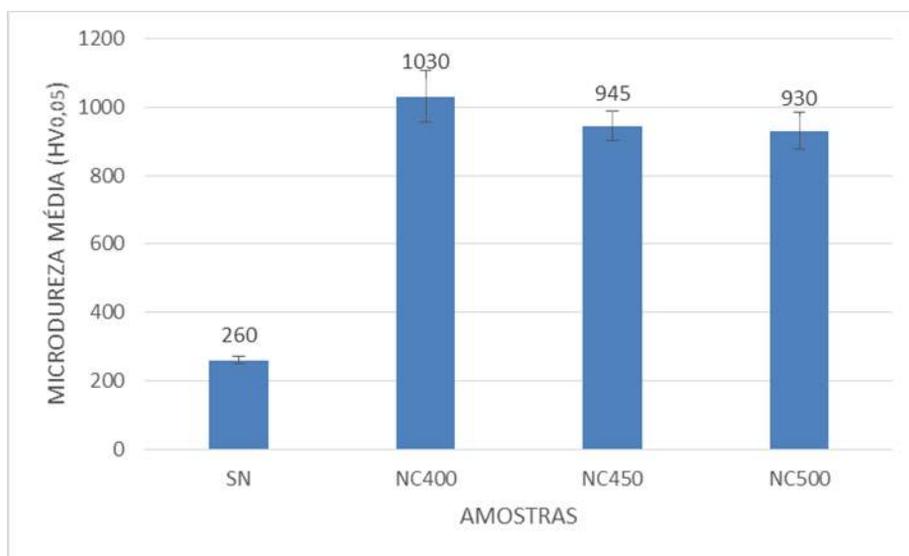


Figura 2. Gráfico de microdureza das amostras tratadas por nitretação por plasma a 400 °C (NC400), 450 °C (NC450) e 500 °C (NC500).

Fonte: Autoria própria.

Os resultados também evidenciam uma diminuição do valor de microdureza superficial com o aumento da temperatura. Temperaturas mais altas aumentam a difusividade do nitrogênio, resultando em camadas de compostos de menor dureza devido à formação de nitretos ferrosos com baixo teor de nitrogênio. Outro fator importante é que o aumento da temperatura favorece a formação de precipitados maiores e em menor número (BORGES et al., 2004). Isto leva ao aumento da distância média entre os precipitados e, conseqüentemente, facilita o movimento das discordâncias, fazendo com que haja uma diminuição da microdureza (DOSREIS et al., 2008).

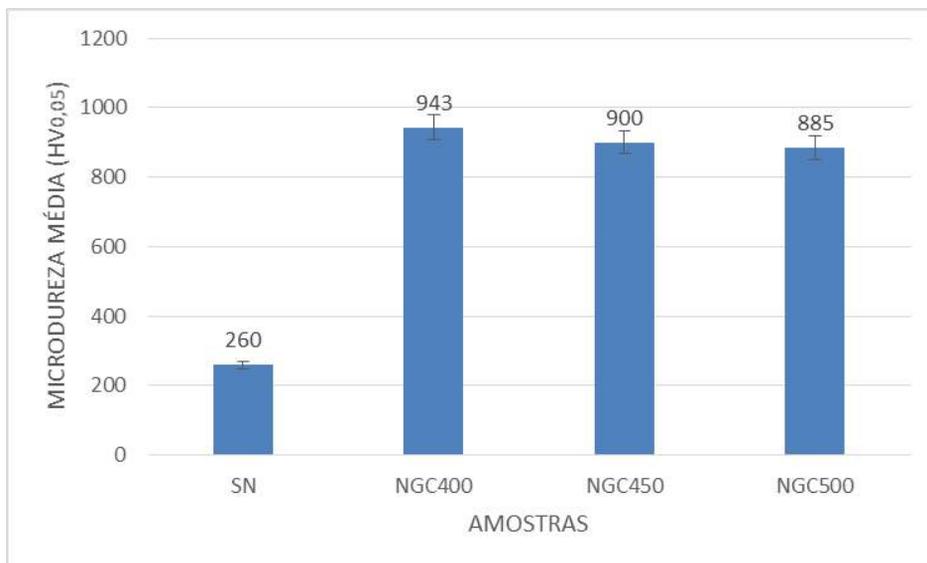


Figura 3. Gráfico de microdureza superficial das amostras tratadas por nitretação iônica em gaiola catódica a 400 °C (NGC400), 450 °C (NGC450) e 500 °C (NGC450).

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4, pode-se observar o perfil de microdureza das amostras nitretadas por plasma, onde foi obtido aumento considerável de microdureza, acima dos 500 HV, até uma profundidade entre 30 e 75 μm , porém vale ressaltar a dispersão nos valores de microdureza atribuída ao efeito de borda provocado pela formação do plasma diretamente na superfície da amostra, o que também é responsável por gerar um perfil de microdureza não uniforme.

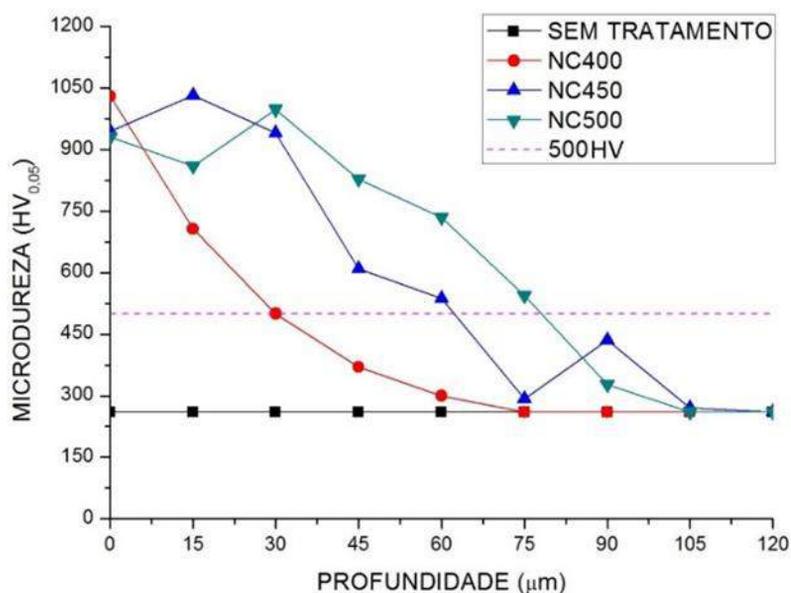


Figura 4. Perfil de microdureza das amostras tratadas por nitretação por plasma a 400 °C (NC400), 450 °C (NC450) e 500 °C (NC500).

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 5, é possível observar a profundidade da zona de difusão através do perfil de microdureza das amostras após a nitretação iônica em gaiola catódica, onde foi obtido aumento

considerável de microdureza, acima dos 500 HV, até uma profundidade entre 40 a 60 μm , bem como um perfil gradual de valores.

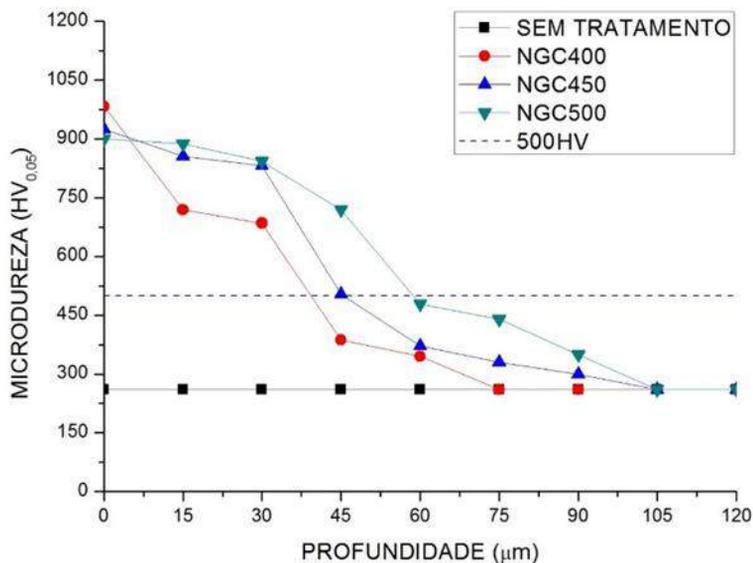


Figura 5. Perfil de microdureza das amostras tratadas por nitretação iônica em gaiola catódica a 400 °C (NGC400), 450 °C (NGC450) e 500 °C (NGC500).

Fonte: Autoria própria.

Os perfis de microdureza de todas as amostras tratadas, tanto por nitretação por plasma como por nitretação iônica em gaiola catódica, evidenciam um aumento na profundidade da camada nitretada e zona de difusão com o aumento da temperatura. Temperaturas mais altas aumentam a difusividade do nitrogênio no substrato, formando nitretos ao longo de uma zona de difusão com maior profundidade (BORGES et al. 2004). A nitretação por plasma produziu amostras com microdureza em uma profundidade maior que na nitretação por plasma em gaiola catódica, porém com valores mais dispersos, não uniformes, de acordo com os perfis de microdureza, o que pode interferir na aplicação deste tratamento em ferramentas, dependendo da sua solicitação.

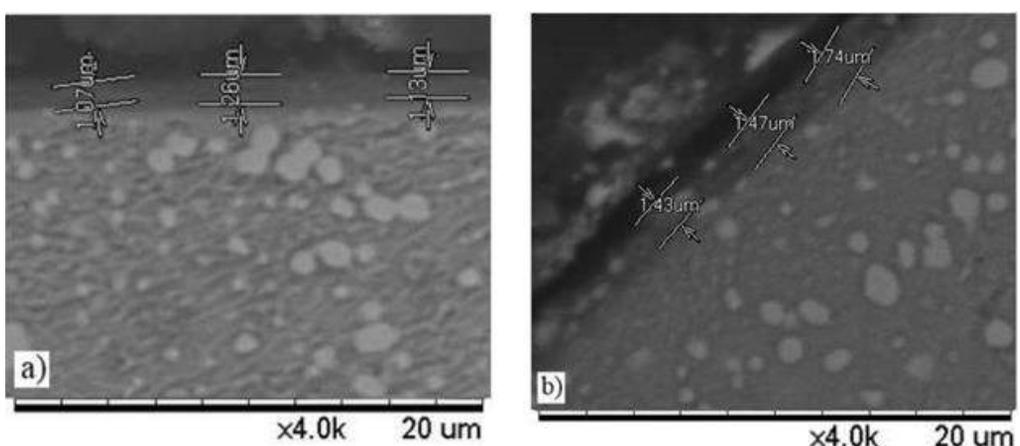


Figura 6. Micrografias por MEV das amostras a) NC500 e b) NGC500, ampliadas 4000x.

Fonte: Autoria própria.

A partir da análise das imagens obtidas por MEV apresentadas na Figura 6, é possível observar que a amostra tratada por nitretação por plasma em gaiola catódica a 500 °C (amostra NGC500) apresentou uma maior espessura da camada nitretada (valores entre 1,43 e 1,74 μm), quando comparada com a amostra tratada por nitretação por plasma (valores entre 1,07 e 1,13 μm), também a 500 °C (amostra NC500). A nitretação em gaiola catódica, além de promover uma camada de compostos mais uniforme, proporciona uma maior taxa de crescimento da camada de compostos (SOUSA et al, 2008). Todas as outras amostras seguiram o mesmo padrão.

A Figura 7 apresenta os valores de produção das ferramentas como recebida de fábrica, recondiçionadas nitretadas por plasma e em gaiola catódica.

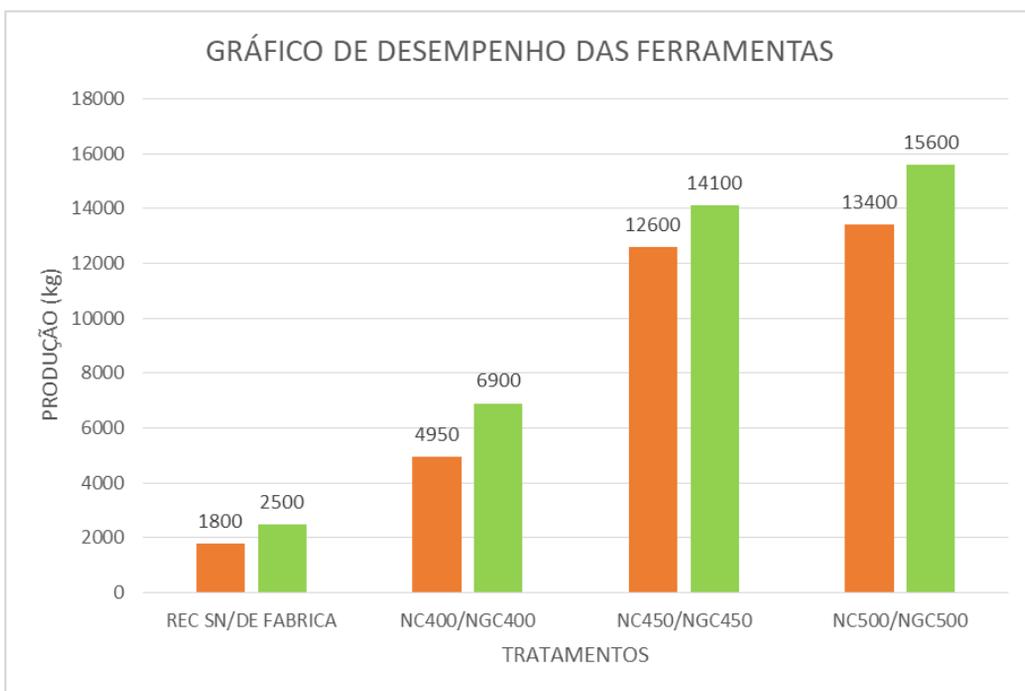


Figura 7. Gráfico de produtividade (quilogramas de pregos produzidos) por ferramenta, de acordo com o tratamento realizado e parâmetros utilizados.

Fonte: Autoria própria.

É possível observar um decréscimo na produtividade da ferramenta recondiçionada sem tratamento por plasma quando comparada com a ferramenta de fábrica, o que era esperado, pois a ferramenta de fábrica vem com uma série de tratamentos superficiais (têmpera, tratamento subzero e nitretação em banho de sais) que são perdidos ao final de sua primeira vida útil. Ao comparar as ferramentas recondiçionadas tratadas, tanto por nitretação por plasma como em gaiola catódica, com a ferramenta recondiçionada sem tratamento, observa-se um expressivo acréscimo na produtividade em todos os diferentes parâmetros utilizados. Este acréscimo se deu principalmente devido ao aumento da microdureza superficial da ferramenta após a nitretação.

Ao analisar os valores de produtividade, em quilograma de pregos produzidos, das ferramentas recondiçionadas tratadas por nitretação por plasma convencional, é possível observar um aumento diretamente proporcional da mesma com o aumento da temperatura de tratamento. Este aumento pode ser atribuído ao aumento da espessura da camada de compostos, que reduz

os efeitos das solicitações de trabalho compressivas inerentes à aplicação da ferramenta. As ferramentas tratadas por nitretação por plasma em gaiola catódica produziram resultados com comportamento similar, porém apresentaram maior rendimento na obtenção de valores de produtividade, em torno de 20% a mais, quando comparados aos tratamentos por nitretação convencional. Isto pode ser atribuído a maior uniformidade da camada de compostos da ferramenta, comprovando a eficiência da técnica de nitretação por plasma em gaiola catódica em eliminar os efeitos indesejáveis da nitretação por plasma convencional quando aplicada em ferramentas punção.

Vale ressaltar que, como consequência do aumento da vida útil, há uma diminuição do número de trocas de ferramentas, o que reduz o tempo de manutenção da máquina e a disponibiliza por mais tempo à produção.

A Figura 8 mostra o perfil da ponta da ferramenta tratada por nitretação a plasma convencional nas condições NC400, antes da sua utilização e ao fim da sua vida útil, evidenciando o desgaste abrasivo e o desgaste por deslizamento ocorrido na ferramenta, característicos de processos não lubrificados de conformação, devido à adesão do material de trabalho à superfície da ferramenta de conformação. Todas as ferramentas de conformação utilizadas seguiram o mesmo padrão de desgaste.

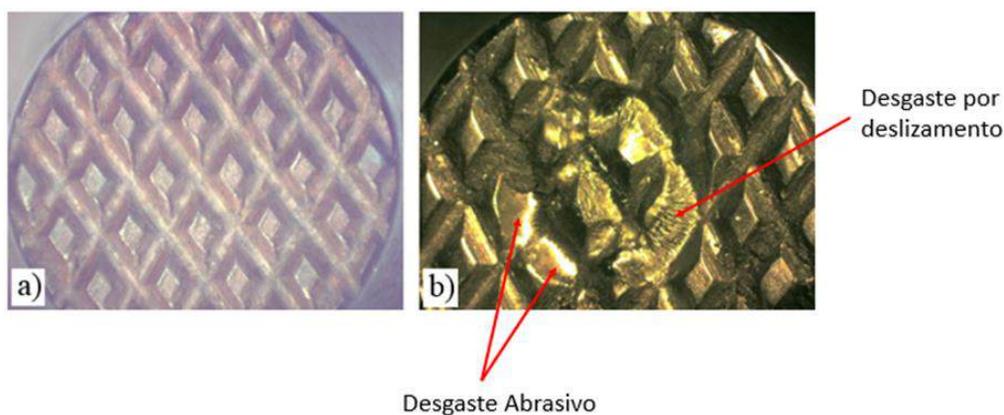


Figura 8. Fotografia do perfil da ponta da ferramenta de conformação a) antes de sua utilização e b) ao final da sua vida útil.

Fonte: Autoria própria.

4. CONCLUSÕES

A aplicação da nitretação por plasma e da nitretação iônica em gaiola catódica aumentam de forma expressiva a microdureza superficial do aço AISI M2 que, por sua vez, se deu devido à formação de nitretos ferrosos de alta dureza, do tipo ϵ -Fe₃N e γ' -Fe₄N, na superfície das amostras nitretadas. Os maiores valores médios de microdureza foram obtidos à temperatura de 400 °C, tanto na nitretação por plasma, proporcionando um aumento de 297%, quanto na nitretação iônica em gaiola catódica, que proporcionou um aumento de 280%, ambos em relação à microdureza do substrato. Com relação à espessura da camada nitretada, foi verificado que o aumento da temperatura favorece o surgimento de camadas nitretadas de maior profundidade, tanto para a

nitretação por plasma como para a nitretação iônica em gaiola catódica. Apesar da nitretação por plasma proporcionar um maior aumento percentual no valor médio de microdureza superficial, bem como maiores profundidades de camada nas temperaturas de 450 °C e 500°C, vale ressaltar a maior uniformidade dos resultados obtidos na nitretação iônica em gaiola catódica. Valores dispersos de microdureza superficial favorecem, por exemplo, o surgimento de tensões internas na superfície que comprometem sua aplicação em ferramentas, diminuindo sua vida útil.

Comparando os resultados de desempenho das ferramentas de conformação nitretadas, a nitretação por plasma em gaiola catódica apresentou uma maior eficiência no aumento da vida útil da ferramenta, que pode ser atribuída à maior uniformidade da camada de compostos quando comparada à nitretação por plasma. Diante disso, recomenda-se a utilização a técnica de nitretação por plasma em gaiola catódica, à temperatura de 500°C, nas ferramentas de conformação a fim de maximizar a sua vida útil.

5. REFERÊNCIAS

- Alves Jr, C.; DeAraújo, F. O.; Ribeiro, K. J. B.; DaCosta, J. A. P.; Sousa, R. R. M. **Use of cathodic cage in plasma nitriding**. *Surface and Coatings Technology*, v. 201, n. 6, pp. 2450-2454, 2006.
- Borges, P. C.; Martinelli, A. E.; Franco, C. V. **Microstructure and Corrosion Behaviour of Plasma-Nitrocarburized Sintered Steel**. *Materials and Corrosion*, v. 55, n. 8, pp. 594-601, 2004.
- DosReis, R. F.; Maliska, A. M.; Borges, P. C. **Nitretação por plasma do aço ISO 5832-1: Influência de temperaturas elevadas de processamento**. *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*, v. 26, n. 4, pp. 205-210, 2008.
- Hacisalihoglu, I.; Yildiz, F.; Alsaran, A. **Wear performance of different nitride-based coatings on plasma nitrided AISI M2 tool steel in dry and lubricated conditions**. *Wear*, v. 384, p. 159-168, 2017.
- Hamann, S.; Börner, K.; Burlacov, I.; Spies, H. J.; Strämke, M.; Strämke, S.; Röpcke, J. **Plasma nitriding monitoring reactor: A model reactor for studying plasma nitriding processes using an active screen**. *Review of Scientific Instruments*, v. 86, n. 12, pp. 123503, 2015.
- Mohammadzadeh, R.; Akbari, A.; Drouet, M. **Microstructure and wear properties of AISI M2 tool steel on RF plasma nitriding at different N₂-H₂ gas compositions**. *Surface and Coatings Technology*, v. 258, p. 566-573, 2014.
- Naeem, M.; Shafiq, M.; Zaka-ul-Islam, M.; Bashir, M. I.; Díaz-Guillén, J. C.; Lopez-Badillo, C. M.; Zakallah, M. **Novel duplex cathodic cage plasma nitriding of non-alloyed steel using aluminum and austenite steel cathodic cages**. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 721, pp. 307-311, 2017.
- Nishimoto, A.; Nii, H.; Narita, R.; Akamatsu, K. **Simultaneous duplex process of TiN coating and nitriding by active screen plasma nitriding**. *Surface and Coatings Technology*, v. 228, n. 1, pp. S558-S562, 2013.
- Rousseau, A. F.; Partridge, J. G.; Mayes, E. L. H.; Toton, J. T.; Kracica, M.; McCulloch, D. G.; Doyle, E. D. **Microstructural and tribological characterisation of a nitriding/TiAlN PVD coating duplex treatment applied to M2 high speed steel tools**. *Surface and Coatings Technology*, v. 272, pp. 403-408, 2015.

SOUSA, R. R. M. **Nitretação em plasma com gaiola catódica: investigação do mecanismo e estudo comparativo com a nitretação em plasma de tensão contínua.** Tese de doutorado, UFRN, Natal, 2007.

Sousa, R. M.; DeAraújo, F. O.; Ribeiro, K. J. B.; DeSousa, R. S.; Barbosa, J. C. P.; Alves Jr., C. **Nitretação iônica em gaiola catódica do aço inoxidável martensítico AISI 420.** Revista Matéria, v. 13, n .1, pp. 104-109, 2008.

Capítulo 08

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE APLICAÇÃO DO AÇO D2 REVESTIDO COM FILME CARBONOSO PARA USO EM FERRAMENTAS DE TRABALHO A FRIO

PETTESON LINNIKER CARVALHO SERRA¹, WESLEY RICK VIANA SAMPAIO², WÊNIO FHARÁ ALENCAR BORGES³, RENAN MATOS MONÇÃO⁴, RÔMULO RIBEIRO MAGALHÃES DE SOUSA⁵, FILIPI MACIEL DE MELO⁶, IGOR ANTONIO DE OLIVEIRA CARVALHO⁷

RESUMO

A busca pela melhoria das propriedades de corte, mecânicas e de resistência ao desgaste são requisitos necessários para conferir uma maior vida útil às ferramentas. Para a consecução dessas propriedades uma alternativa simples e eficiente é a aplicação de filmes finos sobre a superfície das ferramentas de modo a promover a melhoria das propriedades tribológicas e, conseqüentemente, permitir um melhor desempenho do processo produtivo por meio da diminuição de trocas de ferramentas. Este trabalho investiga como resolver um problema comum que ocorre na indústria, tal problema está associado a como melhorar as propriedades mecânicas e aumentar a vida útil de ferramentas para trabalho a frio, reduzindo, assim, o desgaste prematuro de tais ferramentas. O objetivo é avaliar o potencial de aplicação do aço AISI D2 revestido com filme fino carbonoso, em termos de dureza superficial, morfologia e estrutura, para uso em ferramentas de trabalho a frio. Para a deposição dos filmes finos carbonosos foram utilizados três substratos de aço ferramenta AISI D2, tratados termoquimicamente pela técnica de deposição a plasma com gaiola catódica de grafite. A fim de obter e comparar os resultados de dureza superficial dos filmes, a configuração do sistema gaiola catódica-peça foi variada. Após os tratamentos, as amostras foram analisadas por meio do ensaio de microdureza Vickers e pelas técnicas de caracterização por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difração de Raios-X (DRX). Após os tratamentos, observou-se um aumento substancial da dureza superficial das amostras tratadas em comparação à exibida pelo material sem tratamento, no caso mais significativo este aumento foi de um pouco mais de sete vezes em relação à dureza do substrato não tratado. A morfologia dos filmes se mostrou uniforme, com um aspecto tipo camada. A estrutura do filme de carbono se assemelha ao carbono amorfo (a-C). A deposição de filmes carbonosos sobre substratos de aço D2 se mostrou bastante promissora e com um grande potencial de aplicação industrial em ferramentas para trabalho a frio, uma vez que os resultados obtidos corroboram significativamente para a melhoria das propriedades mecânicas e de resistência ao desgaste de tais ferramentas. Este trabalho contribui para a melhoria da eficiência de ferramentas para trabalho a frio, uma vez que a deposição dos filmes finos proposta neste trabalho promove o aumento substancial da dureza superficial e uma melhoria da resistência ao desgaste destas ferramentas, o que corrobora para o aumento do processo produtivo, menor troca de ferramentas e, conseqüentemente, o aumento da vida útil das ferramentas revestidas

¹Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais (UFPI), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB, Campus Cajazeiras, Cajazeiras-PB.

E-mail: plinniker@gmail.com

²Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais (UFPI), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas – IFAL, Campus Macéio, Maceió-AL.

E-mail: wesleyrvs@gmail.com

³Mestre em Engenharia Mecânica (UFPE), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Pedreiras, Pedreiras-MA.

E-mail: wenio.borges@ifma.edu.br

⁴Mestrando em Ciência e Engenharia dos Materiais (UFPI), Universidade Federal do Piauí – UFPI, Teresina-PI.

E-mail: renanmatos2010@hotmail.com

⁵Doutor em Ciência e Engenharia dos Materiais (UFRN), Universidade Federal do Piauí – UFPI, Teresina-PI.

E-mail: romulorms@gmail.com

⁶Mestre em Engenharia Mecânica (UFPB), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Timon, Timon-MA.

E-mail: filipi.melo@ifma.edu.br

⁷Mestre em Engenharia de Materiais (IFPI), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Timon, Timon-MA.

E-mail: igor.carvalho@ifma.edu.br

Palavras-Chave: AISI D2, Filmes finos carbonosos, descontinuidades.

1. INTRODUÇÃO

O aço AISI D2 é um dos aços ferramenta mais utilizados no setor metal-mecânica, principalmente em matrizes e punções utilizadas em operações de conformação e corte a frio. Pode ser tratado termicamente para durezas elevadas mantendo boa resistência à fratura. É um aço com alta penetração de dureza na têmpera e excelente estabilidade dimensional e de forma. É capaz de combinar dois ciclos de tratamento térmico diferentes, permitindo com isso o uso posterior de tratamentos superficiais, como a nitretação e o revestimento PVD - Physical Vapor Deposition (SILVA e MEI, 2010).

A busca pelo aumento da vida útil em ferramentas é uma necessidade na indústria metal-mecânica. Esse aumento pode influenciar os custos de fabricação de duas maneiras, reduzindo a quantidade de ferramentas utilizadas, e reduzindo o tempo passivo empregado para troca de ferramentas desgastadas (BAPTISTA; COPPINI, 2001; BHASKAR; KUDAL, 2017).

Uma alternativa viável e não onerosa de se conseguir esse aumento é através da aplicação de revestimentos superficiais (filmes) sobre a peça/ferramenta por meio de tratamentos termoquímicos que visam a alteração apenas superficial e parcial da ferramenta ou peça, melhorando propriedades como dureza superficial e resistência ao desgaste e à corrosão, mantendo o núcleo tenaz, condição necessária para suportar eventuais esforços de impacto durante as operações de conformação. Uma classe especial para aplicações como revestimentos que conferem essas características são filmes a base de carbono, como, por exemplo, o carbono tipo diamante (ROUSSEAU et al., 2015).

Os filmes finos à base de carbono despertam interesse devido, principalmente, às suas propriedades mecânicas e ao seu potencial de aplicação em diversos segmentos, tais como na indústria metal-mecânica, construção civil, e, também aplicações médicas.

Dentre a categoria de filmes finos carbonosos, uma classe especial e muito utilizada nos dias atuais é a dos filmes DLC (Diamond Like Carbon). O DLC é uma forma metaestável de carbono amorfo que contém uma fração significativa de ligações do tipo sp^3 (DEARNALEY e ARPS, 2005; ROBERTSON, 2002). O carbono forma uma grande variedade de estruturas, cristalinas e desordenadas, por existir em três diferentes hibridizações, sp^3 , sp^2 e sp^1 , podendo, ainda, conter ou não grandes porcentagens de hidrogênio (MANHABOSCO, 2009; ROBERTSON, 2002; SILVA, 2013).

Para Dechandt (2005), em virtude de suas ligações os filmes de DLC podem ser classificados em três grupos:

- Amorfos hidrogenados (a-C:H): contendo menos de 50% de ligações sp^3 com uma pequena porcentagem de hidrogênio;
- Amorfos tetraédricos não hidrogenados (ta-C): contendo alta porcentagem de ligações sp^3 .

Dentre as propriedades dos filmes DLC podemos destacar, o baixo coeficiente de atrito, elevada dureza, alta resistividade elétrica, inércia química e elevada resistência à corrosão. O conjunto destas propriedades faz com que estes filmes sejam bastante empregados em aplicações tribológicas (SILVA, 2013).

Esses filmes podem ser obtidos tanto por processo PVD (*Physical Vapor Deposition*) ou CVD (*Chemical Vapor Deposition*). As técnicas por PVD apresentam entre as principais vantagens, as menores temperaturas do processo, o que é traduzido em um menor custo de energia associado, além de preservar propriedades obtidas em tratamentos térmicos preliminares (ROUSSEAU et al., 2015).

Dentre as técnicas PVD podemos destacar um processo relativamente novo, a deposição a plasma com gaiola catódica. Essa técnica, cujo código de depósito de patente é PI0603213-3, utiliza uma gaiola com geometria bem definida onde o efeito de multi-cátodos cilíndricos é utilizado para a obtenção de revestimentos e tratamentos superficiais tridimensionais, satisfazendo uma série de deficiências do sistema de cátodo oco único, como a necessidade de um sofisticado sistema de controle do posicionamento e/ou rotação das amostras a serem tratadas (ARAÚJO, 2006).

Na deposição com gaiola catódica o alvo do *sputtering* é a gaiola, no processo os átomos “arrancados” podem se combinar com o gás reativo da atmosfera do plasma, formando compostos que se depositam na superfície da amostra que é mantida em potencial flutuante (isolada sobre um disco de alumina). Dessa forma, a gaiola deve ser confeccionada de acordo com o material que se deseja depositar (ARAÚJO, 2006).

Durante o tratamento os inconvenientes do plasma DC convencional como efeito de bordas e abertura de arcos atingem apenas a gaiola, permitindo o tratamento de peças com geometrias complexas, pois além de minimizar esses efeitos indesejáveis, reduz significativamente o gradiente térmico nas amostras. Tendo, ainda, como principal vantagem a formação de uma camada uniforme, independente do formato e do tamanho da peça (SOUSA, 2006; SOUSA, 2007).

1.1. Objetivos

O trabalho visa avaliar o potencial de aplicação do aço AISI D2 revestido com filme fino carbonoso, em termos de dureza superficial, morfologia e estrutura, para uso em ferramentas de trabalho a frio. Os objetivos específicos do trabalho são apresentados abaixo:

- Aplicar filmes finos a base de carbono;
- Avaliar a morfologia e composição dos filmes finos depositados;
- Avaliar a influência dos tratamentos na microdureza das amostras de aço AISI D2.

2. METODOLOGIA

2.1. Preparação das Amostras

Neste trabalho foram utilizadas três amostras de aço ferramenta AISI D2. Inicialmente, as amostras foram cortadas sob a forma de discos apresentando dimensões de 20 mm de diâmetro e 6 mm de altura com a utilização de uma cortadeira metalográfica. Após o corte, a amostra foi lixada com lixas d'água de granulometria 180, 360, 400, 600 e 1200 Mesh. Em seguida, foram polidas em disco de feltro com pasta de alumina para adquirir um aspecto espelhado. Posteriormente, a amostra polida foi limpa em uma solução de acetona durante 10 minutos em um equipamento de ultrassom. Após a etapa de limpeza, a amostra foi seca com o auxílio de um secador e levada para tratamento no reator de plasma.

2.2. Gaiola Catódica

Primariamente, para a deposição dos filmes finos, utilizou-se uma gaiola catódica de grafita mostrada na Figura 1 (a). As dimensões da gaiola são: 50 mm de diâmetro, 35 mm de altura e espessura de 5 mm. O diâmetro dos furos é de 9 mm e a distância entre os centros dos furos adjacentes é de 15 mm. O preparo da gaiola de grafita para o processo de deposição consiste apenas em um leve lixamento, sem a presença de água, para remover eventuais impurezas oriundas de tratamentos anteriores.

O material da tampa da gaiola foi variado sendo empregado para o primeiro tratamento a gaiola de grafita com tampa de grafita e para o segundo tratamento a gaiola de grafita sem tampa; e o terceiro a gaiola de grafita com tampa de titânio. A Figura 1(b) mostra a tampa de titânio utilizada.



Figura 1 – Imagens da (a) Gaiola de grafita e (b) tampa de titânio.

Fonte: Autor, 2019.

A fim de aumentar a taxa de deposição de compostos durante o tratamento, um cátodo oco de aço inox de 70 mm de diâmetro e 50 mm de altura foi utilizado. O mesmo foi posicionado

de forma concêntrica englobando o sistema gaiola catódica + amostra. A Figura 2 mostra o cátodo oco de aço inox utilizado no processo de deposição dos filmes finos.



Figura 2 – Imagem do cátodo oco de aço inox.

Fonte: Autor, 2019.

2.3. Parâmetros de Tratamento

Após a etapa de preparação das amostras as mesmas foram tratadas termoquimicamente por meio da técnica de deposição a plasma com gaiola catódica, obedecendo as condições de tratamento dispostas na Tabela 1.

| Amostra | Arranjo da Gaiola | Atmosfera (sccm) | Pressão (torr) | Temperatura (°C) | Tempo (h) |
|---------|-----------------------------------|---------------------|-------------------|---------------------|--------------|
| 1 | Grafita1 | 75 H2/25 Ar | 1,5 | 450 | 5 |
| 2 | Cilindro de Grafita2 | | | | |
| 3 | Cilindro de Grafita e Tampa de Ti | | | | |

Tabela 1 – Parâmetros de tratamento para a deposição com gaiola catódica em aço D2. Nota: (1) – Grafita = Cilindro e Tampa de Grafita; (2) – Cilindro de Grafita = Cilindro de

Grafita sem tampa.

Fonte: Autor, 2019

2.4. O sistema de deposição a plasma

O sistema utilizado para a deposição dos filmes finos consiste em um reator (câmara de vácuo), tendo como periféricos um conjunto de sensores eletrônicos, um sistema de alimentação de gases e uma fonte de tensão com. Este equipamento pertence ao Laboratório de Processamento de Materiais por Plasma (LabPlasma) da Universidade Federal do Piauí (UFPI). A Figura 3 mostra o aspecto visual do equipamento utilizado para a realização do tratamento de deposição dos filmes finos.

Os tratamentos foram realizados em um reator (câmara de vácuo) da marca SDS plasma no domínio do Laboratório de Processamento de Materiais por Plasma – LabPlasma, da Universidade Federal do Piauí - UFPI. Além da câmara de vácuo o sistema possui um conjunto de sensores eletrônicos, um sistema de alimentação de gases, uma fonte de tensão pulsada e um sistema de vácuo para estabelecer as condições de baixa pressão requeridas. A Figura 3 mostra o reator utilizado nos tratamentos. O reator funciona com tensão alternada máxima de 800 V e tensão pulsada, que previne a formação de arcos.



Figura 3 – Aspecto visual do reator utilizado para a deposição dos filmes finos.

Fonte: Autor, 2019.

O processo de deposição se inicia pela aplicação de uma diferença de potencial entre dois eletrodos. Estes eletrodos são compostos pela parede do reator, que atua como ânodo e pela gaiola, que atua como cátodo. Em condições de temperatura e pressão específicas, quando uma determinada diferença de potencial é aplicada entre os dois eletrodos supracitados, onde estes estão posicionados dentro de uma mistura gasosa, ocorre a geração de uma descarga brilhante, que determina a ocorrência do plasma. O arranjo gaiola catódica-amostra foi montado sobre o porta-amostras do reator, sendo a amostra colocada sobre um disco de alumina de 30 mm de diâmetro e 3 mm de espessura permanecendo, assim, isolada. Esse arranjo está apresentado na Figura 4 (vale ressaltar que o cátodo oco de aço inox foi utilizado em todos os tratamentos englobando o sistema gaiola catódica-amostra).

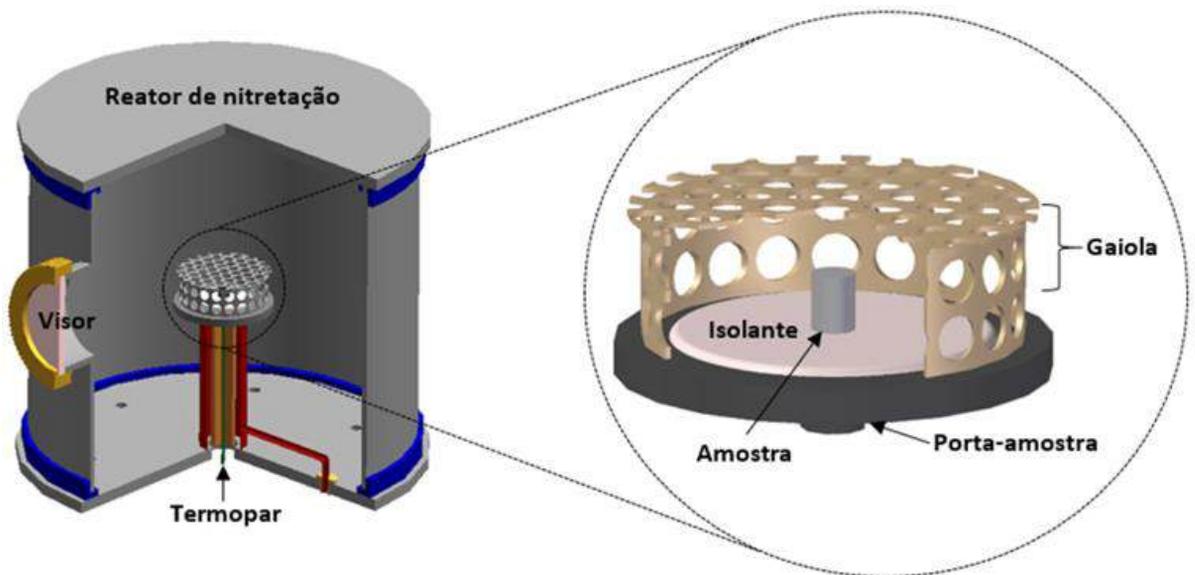


Figura 4 – Arranjo do conjunto gaiola catódica amostra dentro do reator

Fonte: Adaptado de Sousa (2006).

2.5. Caracterização das amostras

2.5.1 Análise de microdureza

Para a verificação da microdureza das amostras tratadas foi utilizado o ensaio de dureza Vickers (HV). Neste ensaio um penetrador piramidal de diamante com base quadrada, com um ângulo de 136° entre as faces opostas, aplica uma carga gradual muito pequena (para este trabalho a carga foi de $50 \text{ gf} = 0,49 \text{ N}$) por um tempo relativamente curto (15 segundos, para este trabalho). Este ensaio é padronizado pelas normas ASTM E92 (Standard Test Method for Vickers Hardness and Knoop Hardness of metallic Materials) e ASTM E384 (Standard Test Method for microindentation Materials).

Os ensaios foram conduzidos em um microdurômetro da marca INSIZE modelo ISH-TDV 1000. Para cada amostra foram realizadas dez identificações ao longo da superfície tratada e os resultados apresentados consistem na média e desvio padrão das dez medidas.

2.5.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise por MEV foi utilizada para avaliar qualitativamente a morfologia da camada depositada nas três amostras. Foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura modelo QUANTA FEG 250 da marca FEI COMPANY com um aumento de 5000 X.

2.5.3. Análise por Difração de Raios – X (DRX)

A detecção das fases presentes nos filmes depositados foi realizada por meio da técnica de difração de raios-X com o auxílio do aparelho de DRX da marca PHILIPS modelo X'PERT MPT

com tubo de cobalto e tensão de operação de 40 kV e corrente de 45 mA. A difratometria de raios-X foi realizada com a geometria Bragg-Brentano e ângulo rasante no difratômetro sob as seguintes condições: radiação Cu-K ($\lambda=1,5418$ nm); ângulo de varredura (2θ) de 30 a 120° e ângulo de avanço ou passo de 0,02°. A identificação das fases foi realizada por meio do software X'Pert High Score Plus.

3. RESULTADOS DE DISCUSSÕES

3.1. Análise de microdureza

A análise dos resultados do ensaio de microdureza dos filmes finos depositados, cujos valores estão apresentados na Tabela 2, leva em consideração as microdurezas médias e o desvio padrão (S) de cada uma das 3 (três) amostras tratadas pela técnica de deposição a plasma com a utilização de gaiola catódica.

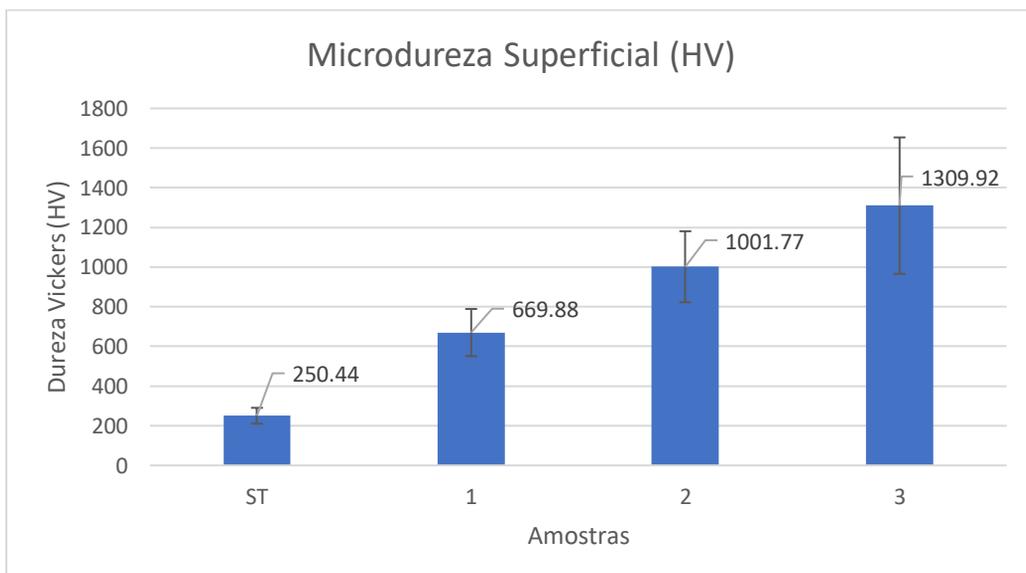


Figura 5 Microdureza das amostras de aço D2 após o tratamento de deposição a plasma.

Nota: ST (amostra sem tratamento)

Fonte: Autor, 2019

A dureza do substrato AISI D2 sem tratamento medida foi de 250,44 HV. Pode-se notar, pela Figura 5, que para todos os resultados de microdureza Vickers, os filmes finos obtidos apresentaram dureza superior à do substrato de aço D2 não tratado. O maior valor médio foi o obtido para a amostra 3 (Tratamento com tampa de grafita), 1309,92 HV, valor este que representa um aumento de 5,2 vezes em relação à dureza do substrato mostrando que o tampa de titânio influenciou positivamente no aumento da dureza superficial. A amostra tratada com gaiola de grafita sem tampa apresentou dureza média de 1001,77 HV, que é 4 vezes maior que a sem tratamento ST e a amostra tratada com gaiola e tampa de grafita apresentou dureza de 669,88, que corresponde a um aumento de 2,7 vezes.

Nota-se que todas as amostras, exceto o tratamento com gaiola e tampa de grafita (amostra 1), apresentaram microdureza média acima de 1000 HV, o que representa um aumento significativo quando comparado com a dureza do substrato. Esse aumento substancial da dureza está associado à deposição de algumas fases que possuem a característica de conferir um aumento na microdureza superficial ao filme fino que reveste o substrato, tais fases estão evidenciadas na análise por DRX. Desse modo, pode-se afirmar que houve a deposição do filme fino.

Outro comportamento que pode ser observado no resultado apresentado na Figura 5 é o elevado desvio padrão apresentado nas medidas de microdureza das amostras tratadas. Esse comportamento está associado a um aumento da rugosidade superficial com a deposição e pode ser observado também na morfologia revelada pelos resultados de microscopia eletrônica de varredura

O tratamento que proporcionou uma maior influência no aumento da dureza superficial foi aquele formado pelo cilindro de grafita com a tampa de titânio (amostra 3).

A técnica de deposição a plasma com a utilização de gaiola catódica se mostrou eficiente no tocante à deposição de filmes finos de elevada dureza superficial em aço AISI D2, principalmente quando o tratamento foi realizado com a configuração de gaiola de grafita com tampa de titânio na presença do cátodo oco de aço inox em uma mistura gasosa de 75 sccm de H₂ com 25 sccm de Ar a 1,5 torr, 450 °C e 5h. Os valores de microdureza obtidos se assemelham à natureza dos filmes DLC, que para os filmes obtidos está mais próxima dos filmes a-C (carbono-amorfo) do que dos filmes ta-C (carbono amorfo tetraédrico). Filmes ta-C apresentam valores entre 2000 a 6000 HV, que são muito superiores aos obtidos neste trabalho (ROBERTSON, 2002). A dureza dos filmes obtidos enquadra-se dentro da classe para filmes mais grafiticos, que não ultrapassam os 2000 HV (ROBERTSON, 2002; SILVA, 2013).

3.2. Análise por Microscopia Eletrônica de Varedura (MEV)

A Figura 6 apresenta as micrografias obtidas por MEV de elétrons secundários (secondary electrons – SE) com magnificação de 5000x das 3 amostras tratadas pela técnica de deposição a plasma com gaiola catódica.

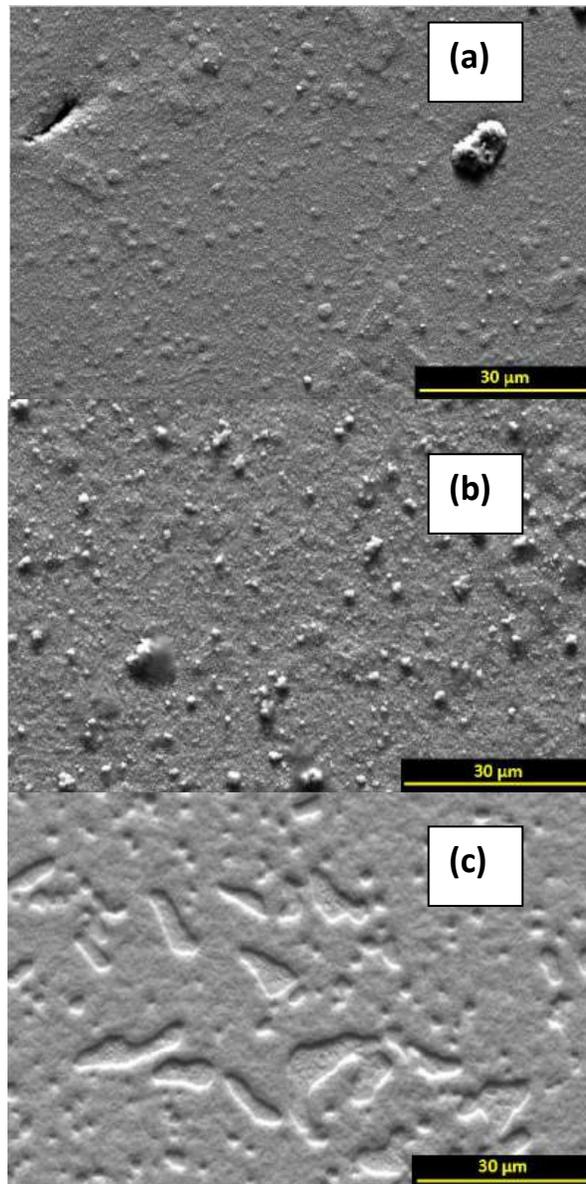


Figura 5 – Micrografias por MEV (SE) das amostras tratadas. (a) amostra 1; (b) amostra 2; (c) amostra 3.

Fonte: Autor, 2019.

As micrografias das amostras tratadas exibiram um aspecto de um filme homogêneo, tipo camada. Para todas as amostras, o cátodo oco de aço inox foi utilizado, contudo, percebe-se, para a amostra 1, que o filme se mostrou mais uniforme devido à presença da tampa de grafita sobre o cilindro de grafita, em comparação com a amostra 2, tratada sem a tampa de grafita, que exibe um aspecto mais rugoso com pequenos aglomerados pontuais no filme. Isso aponta que a utilização da tampa é importante para a obtenção de camadas mais regulares.

Por meio das micrografias é possível explicar os altos valores de desvio padrão encontrados no ensaio de microdureza Vickers. Esse fato é atribuído à rugosidade da superfície dos filmes que faz com que o indentador do ensaio de microdureza aplique uma carga ora em uma região mais baixa da amostra ora em outra mais elevada, e, dessa forma, contribuindo para uma grande variação de dureza. Dentre as amostras tratadas o menor desvio padrão foi exatamente da amostra 1 que conforme discutido apresenta um aspecto menos rugoso nos resultados de microscopia eletrônica de varredura.

3.3. Análise por Difração de Raios - X (DRX)

A Figura 6 mostra os difratogramas de raios-X das amostras tratadas.

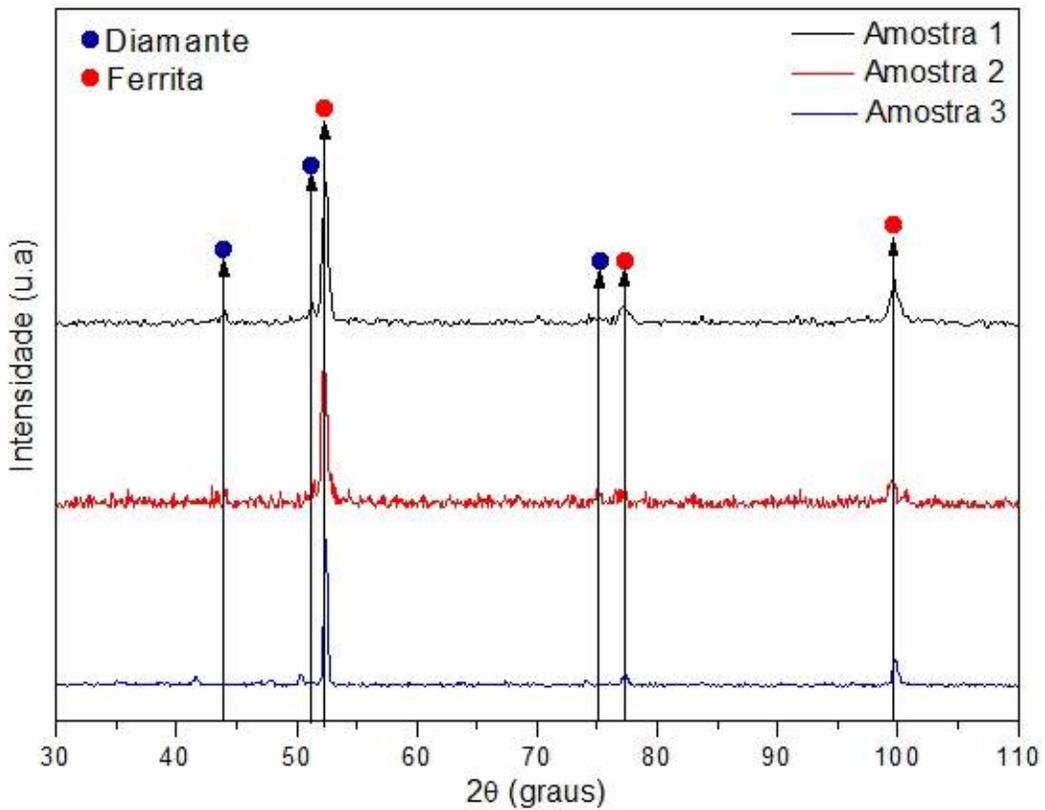


Figura 6 Difratogramas de raios-X das amostras tratadas.

Fonte: Autor, 2019.

As fases observadas nos difratogramas de raio-X das 3 amostras tratadas pela técnica de deposição a plasma com gaiola catódica, apresentadas na Figura 6, foram identificadas por meio do software X'Pert HighScore Plus com a utilização das cartas do ICDD (*International Centre for Diffraction Data*).

Para todos os difratogramas da Figura 6 é possível observar a presença de picos de elevada intensidade para a ferrita em uma posição 2θ de 52,45°; 77,10° e 99,76°. Este constituinte é oriundo do substrato de aço, no qual forma-se por difusão.

Picos característicos da fase carbono tipo diamante (DLC) podem ser observados para todas as amostras tratadas. Liu et al. (2005) tomaram como base um difratograma de referência do diamante para indicar as orientações dos planos cristalográficos desta fase. A partir deste difratograma, nota-se que há a coincidência de picos em posições 2θ de aproximadamente 43,90° referente à orientação (111) e 75,47° associado à orientação (220). Assim, pode-se inferir que a fase de carbono tipo diamante foi depositada nas amostras tratadas, podendo, dessa forma, justificar o aumento significativo da microdureza superficial das amostras após o tratamento.

4. CONCLUSÕES

Os filmes finos obtidos neste trabalho confirmam de forma parcial o potencial de aplicação destes filmes através da técnica de deposição com gaiola catódica em aço AISI D2, utilizado em ferramentas para trabalho a frio.

Foi observado um aumento considerável (até mais de 5 vezes) na dureza superficial das amostras de AISI D2 através da aplicação dos filmes carbonosos. Porém foi observado uma grande variação das medidas de microdureza, o que indicou uma pobre uniformidade da camada.

Para se conseguir aplicar esses filmes de forma comercial, se faz necessário a melhoria da uniformidade da dureza superficial, de modo a garantir que toda a superfície da ferramenta apresente o mesmo nível de dureza em toda a área revestida. O tratamento de deposição utilizado, não mostrou a eficiência necessária.

A morfologia revelada pelo MEV mostrou uma relação entre o aumento da rugosidade superficial com o desvio padrão nos ensaios de microdureza.

O tratamento sem tampa mostrou-se menos eficiente para deposição de camadas uniformes, gerando filmes mais irregulares na superfície.

A Difração de Raios X comprovaram a formação de camadas ricas em carbono em todos os tratamentos, o que foi evidenciado através do aparecimento da fase diamante além da fase ferrita. A formação dessas camadas foi associada ao aumento da dureza superficial.

Uma alternativa para melhorar os resultados é a aplicação de tratamento duplex tratamento de nitretação na amostra e logo em seguida a deposição do filme fino carbonoso, garantindo, assim, uma maior uniformidade em relação à dureza superficial.

O trabalho representa um passo importante para aplicação da técnica de gaiola catódica na deposição de filmes DLC e deve contribuir para o embasamento de trabalho que otimizem esse desempenho.

5. REFERÊNCIAS

ARAÚJO, F. O. D. **Desenvolvimento e caracterização de dispositivos para deposição de filmes finos por descarga em cátodo oco**. 2006. Tese (Doutorado) - Ciência e engenharia de materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

BAPTISTA, E. A.; COPPINI, N. L. **Maximizando o Lucro: Otimizando Processos de Usinagem Com Auxílio de Sistema Especialista**. Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Anais...2001

BHASKAR, S. V.; KUDAL, H. N. Tribology of nitrided-coated steel-a review. **Archives of Mechanical Technology and Materials**, v. 37, n. 1, p. 50–57, 2017.

DEARNALEY, G.; ARPS, J.H. Biomedical applications of diamond-like carbon (DLC) coatings: A review. **Surface and Coatings Technology** . p. 2518 - 2524. 2005.

DECHANDT, S. T. **Características de filmes duros de carbono amorfo DLC depositados em polietileno de peso molecular ultra alto empregado em próteses ortopédicas** . 2005. Dissertação (Mestrado) -

Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2005.

LIU et al . Residual stresses of diamond and diamondlike carbon films. **Journal of Applied Physics**, 98 v. 2005.

MANHABOSCO, T.M. **Tribocorrosão da Liga Ti6Al4V, Liga Nitretada, Ti6Al4V Revestida por FilmesDiamond-Like Carbon (DLC) e Obtenção Eletroquímica de Filmes DLC** . 2009. Tese (Doutorado) - Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2009.

MURAKAWA, M. et al.. Deep-drawing of aluminium sheets without lubricants by use of DLC coated dies. **Surface and Coatings Technology** . p. 553 - 558. 1995.

ROBERTSON, J.. Diamond like amorphous carbon. **Material Science and Engineering**. 2002.

ROUSSEAU, A. F. et al. Microstructural and tribological characterisation of a nitriding/TiAlN PVD coating duplex treatment applied to M2 High Speed Steel tools. **Surface and Coatings Technology**, v. 272, p. 403–408, 2015.

SAMPAIO, W. R. V.. **Deposição de filmes carbonosos em aço AISI D2 pela técnica de gaiola catódica**. 2017. Dissertação (Mestrado) - Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2017.

SILVA, A. L. V. da C.; MEI, P.R. **Aços e ligas especiais**. São Paulo: Blucher, 2010.

SILVA, H.M.S. **Caraterização Morfológica, Mecânica e Tribológica de Filmes Diamond like Carbon**. 2013. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Faculdade de Engenharia daUniversidade do Porto, Porto, 2013.

SOUSA, R. R. M.. **Nitretação em plasma com gaiola catódica: investigação do mecanismo e estudocomparativo com a nitretação em plasma de tensão contínua.** 2007. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

SOUSA, R. R. M.. **Nitretação iônica sem efeito de borda: desenvolvimento e avaliação de uma nova técnica.** . 2006. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

VETTER, J. et al.. Hard coatings for lubrication reduction in metal forming. **Surface and CoatingsTechnology**. p. 739 - 747. 1996.

Capítulo 09

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS PARA AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 E SUAS DEFORMAÇÕES RESULTANTES DE TESTES DE TENSÃO EM DIFERENTES TEMPERATURAS, VELOCIDADES E DIREÇÕES DE LAMINAÇÃO

WÊNIO FHARÁ ALENCAR BORGES¹, ANDRÉ LUÍS RODRIGUES SANTANA², YURI JOSÉ LUZ MOURA³, LUIZ HENRIQUE PORTELA DE ABREU⁴, ANDRÉ SALES AGUIAR FURTADO⁵, FILIPI MACIEL DE MELO⁶, IGOR ANTONIO DE OLIVEIRA CARVALHO⁷

RESUMO

Os aços inoxidáveis austeníticos de classe 304 além de sua principal característica que seria a resistência à corrosão apresentam um bom limite de resistência a tração-LRT em concílio a uma boa ductilidade, tenacidade quando em diferentes situações. Através de uma revisão bibliográfica acerca do aço inoxidável AISI 304 se propôs a observar, analisar qualitativamente e quantificar suas propriedades mecânicas quando exposto ao ensaio de tração. Se observou as temperaturas, velocidades, direções de laminação e níveis de encruamento que o material possui quando em ensaio, utilizando-se o diagrama tensão-deformação de engenharia e o verdadeiro com velocidades de deformação plástica entre 2-30 mm por minuto e 5-500 mm/min, com testes nas temperaturas entre -253° e 27°C, e direções de laminação entre 0°, 45°, 90° graus. A frente de tantas circunstâncias o material se mostrou diretamente afetado a todas as variáveis, mas com um bom LRT e propriedades mecânicas se mostrando; tenaz, dúctil, anisotrópico, com baixa resiliência e com deformação descontrolada e instável quando imposto a velocidades críticas. Possuindo três níveis de encruamento que sua observação depende da temperatura imposta e velocidade, se observou bem como a aparição de fases martensíticas quando deformado que afetava diretamente sua dureza, deformação e resistência.

Palavras-Chave: Aço inoxidável austenítico 304, propriedades mecânicas, ensaio de tração.

1. INTRODUÇÃO

O estudo do comportamento e propriedades mecânicas do aço inoxidável austenítico quando imposto a uma carga de tração ainda é uma forte fonte de pesquisadores e das ciências

¹Mestre em Engenharia Mecânica (UFPE), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Pedreiras, Pedreiras-MA.

E-mail: wenio.borges@ifma.edu.br

²Bacharel em Engenharia Mecânica (UNINASSAU), Faculdade Maurício de Nassau - Filial FAP (Faculdade Piauiense), Teresina-PI.

E-mail: andre_luis.santana@hotmail.com

³Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais (UFPI), Faculdade Maurício de Nassau - Filial FAP (Faculdade Piauiense), Teresina-PI.

E-mail: yure_jose@hotmail.com

⁴Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais (UFPI), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM, Campus Manaus Distrito Industrial, Manaus-AM.

E-mail: luizhabreu92@gmail.com

⁵Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais (UFPI), Universidade Federal do Piauí – UFPI, Teresina-PI.

E-mail: salesandre7@gmail.com

⁶Mestre em Engenharia Mecânica (UFPB), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Timon, Timon-MA.

E-mail: filipi.melo@ifma.edu.br

⁷Mestre em Engenharia de Materiais (IFPI), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Timon, Timon-MA.

E-mail: igor.carvalho@ifma.edu.br

dos materiais, devido sua capacidade de resistir a diferentes tipos de estímulos como químicos, e térmicos em concilio a forças axiais e sua variação de deformação em relação a altas e baixas temperaturas. A diferentes tipos de aços inoxidáveis como os ferríticos, austeníticos e martensíticos, endurecíveis por precipitação, são baseadas na estrutura química do material dando aos mesmos, características mecânicas e de resistência a corrosão. Os aços inoxidáveis austeníticos são mais utilizados em aplicações de engenharia devido as suas excelentes propriedades de resistência, corrosão, solubilidade e propriedades mecânicas (SANTOS, ANDRADE, 2008).

O ensaio mecânico de tração e considerado o meio mais simples para se obter as propriedades mecânicas de um material, suas deformações, e variação quando imposto a diferentes temperaturas. As normas utilizadas para a padronização dos ensaios podem ser nacionais e internacionais, sendo que a temperatura de ensaio, forma do corpo de prova e dimensões são fatores determinantes para a escolha da norma. As normas mais utilizadas no Brasil são: ASTM (*American Society for Testing and Materials*), ISO (*International Organization for Standardization*) e ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). Tais órgãos regulamentadores não possuem padrões somente para a realização do ensaio mas existem normas que especificam quanto a avaliação das propriedades obtidas no ensaio bem como a preparação para o mesmo, fixação do corpo de prova na máquina, se leva em conta até sua forma seja prismática, em chapa ou em tubos.

Através do ensaio de tração pode se obter algumas propriedades mecânicas como o limite de resistência a tração-LRT, coeficiente de resistência, limite de escoamento-LE, módulo de tenacidade, ductilidade, módulo de resiliência, módulo de elasticidade e o coeficiente de encruamento do material (GARCIA et al, 2000a).

Todo projeto de engenharia requer conhecer profundamente o material que vai ser utilizado, com isso os critérios de escolha e especificação levaram a realizar ensaios mecânicos normatizados afim de conhecer suas propriedades mecânicas e comportamento quando imposto a algum esforço ou temperatura em conjunto com a mesma, essa normatização e necessária para criar um ambiente de maior confiança das informações obtidas, padronização e ajuda na comunicação entre comprador e fabricante já que os ensaios são utilizados no processo de fabricação (GARCIA et al, 2000b).

A aço inoxidável austenítico AISI (American Iron And Steel Institute) 304 quando deformado em diferentes temperaturas poderá sofrer algumas mudanças em sua estrutura cristalina e estrutura de grãos sendo de grande importância o estudo dessas modificações, devido ao fato que essas mudanças alteram completamente as suas propriedades mecânicas e suas aplicações estão diretamente relacionas a sua microestrutura.

Mas não só por sua capacidade de mutação a frente de fatores externos mas de se poder modificar suas propriedades quando imposto a uma tensão, temperatura especifico ou projeto que apresente características igualitárias, pelo simples fato que cada material vai apresentar características que são inúmeros referentes aos seus diferentes tipos de morfologia e composição

química, ou seja, cada material possui características únicas ou podem se fazer possuir com a ajuda de pesquisas que visem a modificação de suas propriedades, assim evidenciando o quanto os processos de endurecibilidade, amolecimento, e químicos refletem diretamente em sua deformação e propriedades mecânicas.

A utilização do aço inoxidável ainda é considerado uma extravagância para a solução de problemas dentro de projetos de engenharia devido ao seu alto custo, a grande maioria das normas de projeto em aço inox são baseado em aço carbono, no entanto o aço inox se difere pois quando exposto a testes de tração apresentam quatro curvas de tensão σ versus deformação ϵ específicas não-lineares, sem grau de escoamento e com região de encruamento bem definido (tração e compressão, paralela e perpendicular a direção de laminação) alterando o seu comportamento absoluto quando comparado ao aço carbono (SANTOS, 2015).

O presente trabalho visa através de estudo bibliográficos, incorporar pesquisas referentes ao aço inox austenítico AISI 304 afins de demonstrar suas propriedades mecânicas, deformação em diferentes temperaturas, velocidades, e direções de laminação com intuito de analisar, interpretar os dados obtidos e quantificar quanto as suas propriedades, quando imposto a uma carga axial de tração. Todavia demonstrando o seu potencial construtivo e características a diferentes variáveis.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente artigo segue o princípio de revisão bibliográfica que segundo Medeiros e Tomasi (2008) auxilia até mesmo nos objetivos da pesquisa científica, contribuindo nas construções teóricas e na comparação e obtenção e validação dos resultados dos trabalhos de conclusão de curso e artigos científicos. A atual pesquisa teve início no ano de 2019 primeiro com o estudo e conhecimento sobre os ensaios mecânicos, propriedades e normas reguladoras.

As principais fontes de pesquisa foram do periódicos CAPES (*Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior*) de sua base, mais precisamente através da busca por área de conhecimento onde se selecionou engenharia e como subáreas; Engenharia Mecânica, Engenharia de Materiais e Metalúrgica, assim dando acesso a acervos digitais como Univates, Metallum, Lume repositório digital, Revista Matéria, Revista Escola Minas: Metalurgia física, Universidade de Aveiro, contudo o google acadêmico, scielo serviram de intermediários para teses, monografias e dissertações. Foram selecionados dez materiais dos quais uma monografia, quatro artigos e uma dissertação, totalizando seis trabalhos que foram aprovadas para a revisão de suas informações tendo como tema de pesquisa para os respectivos itens encontrados: Aço inoxidável AISI 304 ensaios. Com composição química semelhante ou abaixo da máxima indica conforme o ABNT/SAE/AISI Tab. 1 indicada abaixo:

Tabela 1. Composição química do aço 304 (% em peso). Disponível em:
<http://www.favorit.com.br/produtos/acos-inoxidaveis/aco-aisi-304-aisi-304-l>

| AISI | C máx. | Mn máx. | P máx. | S máx. | Si máx. | Ni | Cr | N máx. |
|------|--------|---------|--------|--------|---------|-------------|--------------|--------|
| 304 | 0,08 | 2,00 | 0,045 | 0,030 | 0,75 | 8,00 -10,50 | 18,00 -20,00 | 0,10 |

Os critérios de inclusão foram artigos publicados no período de 2005 a 2019 e que relatassem sobre as propriedades mecânicas do AISI 304 e suas deformações quando imposto ao ensaio de tração, lembrando que artigos que continham variação de temperatura nos respectivos testes e que CP's (Corpos de provas) que tenham sido confeccionado em diferentes angulações em referência a sua laminação e levando em conta também a direção do ensaio de tração, e que o material do AISI 304 correspondia a tabela da ABNT de composição química por peso medido em porcentagem foram incluídos na presente análise.

Adicionalmente, foram critérios de exclusão também, materiais que não se enquadravam na classe dos aços inoxidáveis AISI 304, artigos que ultrapassaram o período exploratório, se excluiu também pesquisas na qual se obteve as propriedades mecânicas do material por meio de qualquer outro ensaio que não tenha sido de tração e que não continham nenhuma das palavras chaves mesmo o material sendo equivalente.

A presente revisão bibliográfica tem caráter qualitativo referente as propriedades do material e seu potencial reativo a algumas variáveis e deformativo. E sua pesquisa sendo do tipo; explicativa visando registrar dados, analisa-los, interpretar e identificar suas causas. (LAKATOS, MARCONI, 2011)

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos serão referentes a análise e interpretação dos valores e qualificações que o material estudado possui se gráficos, tabelas e figuras presentes nos artigos selecionados que fazem menção aos valores e observações encontradas em diagramas tensão σ -deformação ε ou (tensão e alongação) verdadeiro, diagrama tensão σ -deformação ε com as diferentes direções de angulação referente a laminação, micrografias, no entanto principalmente se analisou os valores referentes aos ensaios de tração dos respectivos corpos de prova porque através dessa informações poder se chegar a um resultado e discussão referente ao objetivo do presente artigo, se observou também as condições de temperatura que os CP'S foram submetidos, direção de laminação fazendo referência a direção do ensaio. Dimensões dos provetes e a espessura, de onde se retirou o aço a ser testado que levou em conta também a sua originalidade se todos foram retirados de um único material com fabricante específico ou se utilizaram corpos de prova de fabricantes diferentes ou iguais e tratamentos térmicos ou acabamentos usados no processo de produção do aço, inclusive tratamentos de conformação para se chegar ao produto final que seria uma chapa.

Tabela 2. Autores e sua metodologia, objetivos, resultados e conclusões.

| Autor | Ano | Método | Objetivos | Resultados | Conclusão |
|-------------------|------|-------------------|--|---|--|
| Zheng e Yu | 2018 | Pesquisa de campo | Determinar a influência de baixas e altas temperatura nas propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 304, força de rendimento real, verdadeira tensão uniforme. | Gráficos convencionais e verdadeiros de tensão/deformação (σ - ϵ) em diferentes temperaturas, com níveis de estágios predefinidos em função da taxa de endurecimento e deformação em diferentes temperaturas. | Com a diminuição de temperatura houve o rendimento de força e resistência a tração aumentaram de 20-77 Kelvin, mas de 77-298 K a resistência diminui rapidamente, notou-se três estágios de endurecimento de 20-298K |
| Purper | 2016 | Pesquisa de campo | Analisar, verificar a influência da anisotropia no limite de escoamento, resistência a tração e magnetismo do aço inoxidável AISI 304. | Os valores obtidos nos ensaios mecânicos de tração em diferentes direções de laminação apresentaram mudanças no LE, LRT e alongamento. | Em todos os testes o material mostrou ser anisotrópico, porém os corpos de prova com direção de laminação de 45° se mostraram ser isotrópico. |
| Anderson et al | 2016 | Pesquisa de campo | Avaliar a microestrutura do aço SAE 304 (Micrografias). | A tração proposta pelo ensaio mecânico de flexão teve uma maior capacidade de deformação dos grãos do que o próprio ensaio de tração. | No ensaio de flexão na área tracionada se observou o crescimento desse grão em quanto na área comprimida a sua diminuição. |
| Santos e Andrade | 2008 | Pesquisa de campo | Obter, avaliar dilatometricamente diferentes quantidades de Martensitas conforme ocorre a deformação no aço austenítico ABNT 304. | Se observou que quando exposto a baixas temperaturas á o aumento de sua capacidade de resistir a tensão devido a facilidade de surgimento de fases martensíticas. | A reversão das Martensitas foram 50 a 200°C e 500 a 800°C, o surgimento da Martensitas α' e maior em temperaturas de deformação baixas e que em uma mesma temperatura a mesma aumenta com a deformação. |
| Antunes e Antunes | 2007 | Pesquisa de campo | Relacionar as deformações plásticas do aço inoxidável austenítico com diferentes temperaturas com patamares de encruamento detectado. | A temperatura afeta diretamente o LRT, LE, força magnética, deformação e as regiões de encruamento do aço austenítico. | Dependendo da temperatura de ensaio podem apresentar até três níveis de encruamento, quando as temperaturas são baixar a o surgimento de fases martensíticas ocasionado menor deformação. |

| | | | | | |
|-------|------|-------------------|---|--|--|
| Rocha | 2005 | Pesquisa de campo | Evidencia se a velocidade de deformação altera as propriedades do aço inoxidável AISI 304, determinar a relação das direções de laminação com a anisotropia e isotropia | Diagrama tensão-deformação em três direções de laminação, em três velocidades diferentes $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-2}$, $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-3}$, com o aumento da velocidade acontecia o aumento da temperatura interna. | Forte anisotropia, valores elevados de velocidade causaram instabilidade plástica, se evidenciou fases martensíticas na deformação e o aumento da velocidade causa uma diminuição de deformação final do corpo |
|-------|------|-------------------|---|--|--|

Na tabela abaixo, Purper (2016), realizou o ensaio de tração em 15 CP's com diferentes direções de laminação 0° , 45° e 90° , sendo que cinco provetes para cada ângulo, onde em todos se constatou o limite de escoamento (LE), limite de resistência a tração (LRT), alongamento ou o mesmo que sua deformação dado em %. Informações retiradas e interpretadas de um gráfico convencional de engenharia.

Se observa que os valores variaram de forma controlada e com uma pequena diferença de inteiros e décimos, contudo o gráfico de tensão e deformação desses provetes testados terão quase a mesma característica pode se notar também que o LE nas três angulações ficou no mínimo de 300 MPa, LRT 600 MPa, e alongamento em torno de 60%, esses valores são considerados previstos para que a classe estudada suporte, em efeito de comparação um aço SAE 1040 tem uma resistência de 620 MP e um ferro com alto teor de carbono sendo mais utilizado em ferramentas industriais.

Em contra partida se observa a mesma análise feita por Rocha (2005), ele propôs ao estudo que os ensaios mecânicos deveriam ser feitos em ângulos diferentes a sua laminação e expos os resultados na forma do gráfico tensão σ - deformação ϵ verdadeiros, de acordo com o Fig. 1 percebe se uma pequena zona elástica mas uma grande área de tenacidade e uma boa ductilidade chegando a ultrapassar os 50 % quando sua direção de laminação e 90° com uma velocidade de deformação plástica de $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ equivalente a 5mm por minuto, o mesmo analisou em diferentes velocidades a fim de determinar se a variação de tempo do ensaio tinha influencia na deformação plástica e encruamento do aço. A Figura 2 demonstra o experimento em um gráfico de engenharia.

Tabela 3. Valores de LE, LRT, e alongamento dos corpos de prova. Adaptado de Purper (2016).

| Sentido de laminação | LE MPa | LRT MPa | Alongamento % |
|----------------------|---------------|---------------|---------------|
| 0° | 331,70-335,63 | 630,61-638,63 | 63,52-70,12 |
| 45° | 332,10-340,15 | 603,15-624,43 | 65,65-73,53 |
| 90° | 325,83-328,60 | 629,73-643,06 | 71,37-73,53 |

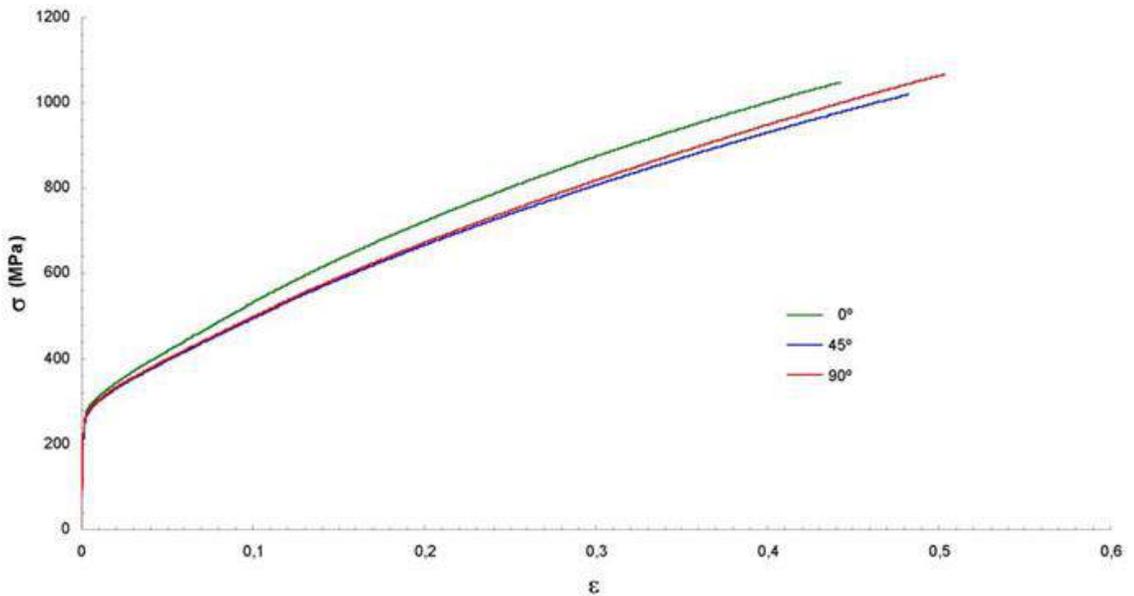


Figura 1. Curva tensão/deformação (σ - ϵ) do aço austenítico AISI 304, em diferentes direções de laminação 0° , 45° , 90° com deformação e tensão verdadeira. Adaptado de Rocha (2005).

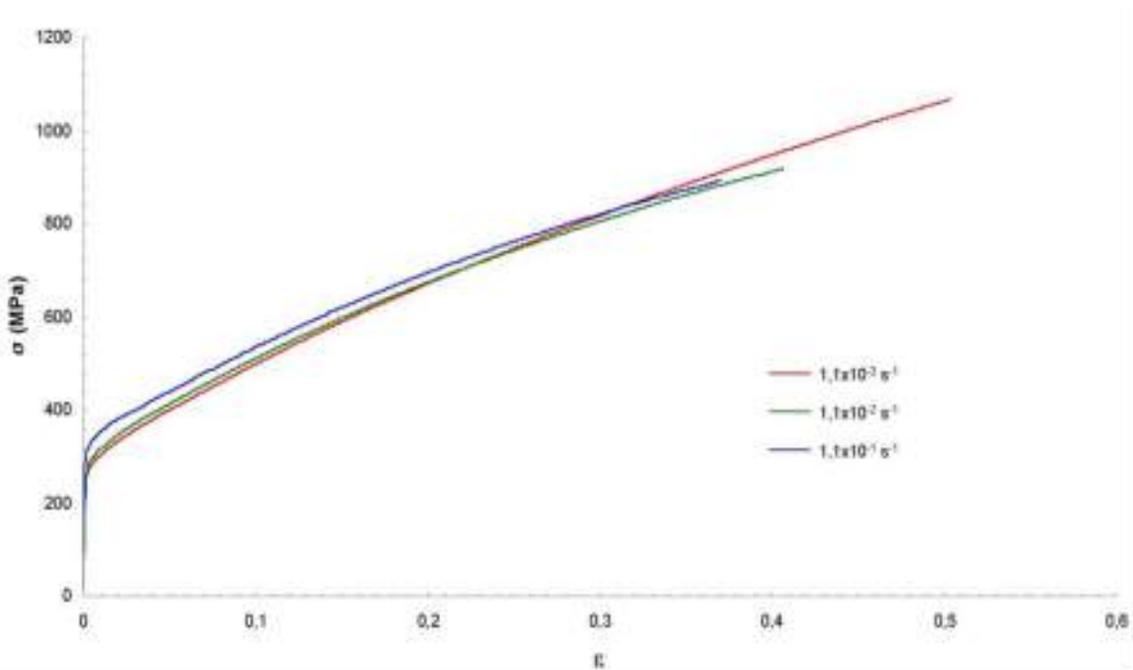


Figura 2. Curva tensão/deformação (σ - ϵ) verdadeira do aço AISI 304 em diferentes velocidades de ensaio; $1,1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, $1,1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, $1,1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ de 5 a 500 mm/min (Rocha, 2005).

O achatamento prévio dos grãos foi demonstrado via uma micrografia transversal do corpo de prova proveniente do processo de laminação. Em comparação Anderson et al (2016) demonstrou via micrografia que antes do ensaio os grãos tinham uma dimensão de $9,36 \mu\text{m}$ e após $13,25 \mu\text{m}$ uma diferença pequena quando expressa na ordem de porcentagem em torno de 3,89% e um alongamento pequeno mais considerável levando em conta que o processo de conformação mecânica já coloca esse grão em deformação transversal. Quando comparado aos ensaios de Purper (2016) a sua LRT foi consideravelmente razoável, mas expressiva na ordem de 513 MPa, mas deve se salientar que as velocidades por minuto foram diferentes. Rocha (2005), demonstrou que quando maior for minha velocidade de deformação plástica menor será o

alongamento da parte útil do meu corpo de prova, conseqüentemente a sua tensão suportada também se altera devido ao fato que o material perde sua capacidade de ductilidade devido ao aumento de velocidade, e sua tenacidade altera-se também devido ao fato do decréscimo do LRT e da área abaixo do gráfico. Então percebe-se um aumento de dureza em função da deformação já que com o aumento de velocidade a deformação ocorre com menor intervalo de tempo ocasionando fazes martensíticas no aço austenítico.

Vale ressaltar que valores do gráfico tensão σ -deformação ϵ , comportamento e deformação são diferentes do convencional e do verdadeiro termo usado para identificar os resultados dos ensaios que contem maior precisão das informações obtidas.

Segundo Santos e Andrade, (2008) a realização dos ensaios mecânicos em diferentes temperaturas poderiam ocasionar modificações em seu comportamento mecânico de deformação e alteração no seu gráfico, percebe se também que os ensaios estudados possuem diferentes velocidades e temperaturas até mesmo na forma de obtenção dos resultado pela utilização de meios mais tecnológicos ou convencionais em contrapartida os resultados gráfico com autores que propuseram os seus ensaios a mesma tecnologia ou seja fazendo menção as formas de análise verdadeiras que se assemelham mais ao que acontece instantaneamente com o objeto a ser estudado. Em comparação Antunes e Antunes (2007) realizou a mesma análise a temperaturas de -196°C , -80°C , 0°C e 27°C em quanto que no ensaio de Santos e Andrade (2008) variou apenas de -50°C e 20°C . Zheng (2018) propôs a mesma forma de análise em diversas temperaturas variando de $-253,25$ a $24,85^{\circ}$ Celsius procurando evidenciar a influência da temperatura na propriedade mecânica Aço. Então notou-se que quando menor for a temperatura maior será sua resistência a tensão e menor alongamento e quanto maior sua temperatura menor será a tensão suportada, porém com um alongamento maior, conforme indica as Fig. 3 e Fig. 4. O comportamento de representação das três fazes visíveis de encruamento se dá em menor temperatura porque segundo Antunes e Antunes (2007) quando o aço inoxidável austenítico e deformado a frio o mesmo cria fases martensíticas possibilitando assim um aumento do LRT e uma diminuição do alongamento devido as propriedades da nova fase, a sua quantidade formada tem relação direta coma estabilidade da austenita, mas isso só acontece até um limite de temperatura após esse limite não terá mais criação de fases martensíticas.

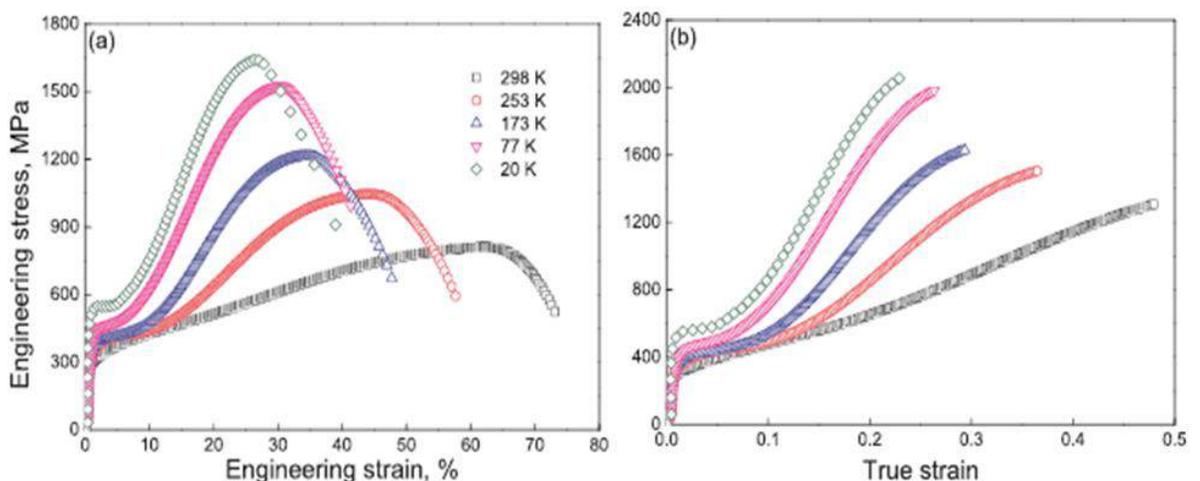


Figura 3. Gráfico convencional de tensão/deformação (σ - ϵ) em diferentes temperaturas: (a), Gráfico de tensão/deformação (σ - ϵ) real de engenharia em diferentes temperaturas. Adaptado de Zheng (2018).

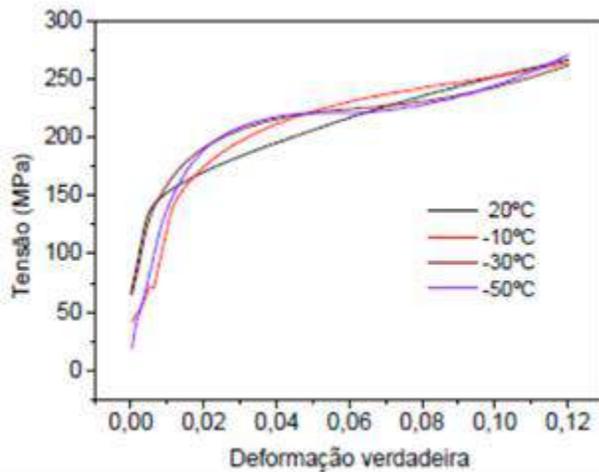


Figura 4. Curva tensão/deformação (σ - ϵ) verdadeira do aço inoxidável AISI 304, com deformação de até 0,12% em diferentes temperaturas. Adaptado de Santos e Andrade (2008).

Segundo a Figura 5, adaptada de Essoussi (2019), percebe-se que a temperatura exerce influência direta na dureza do material, o gráfico de dureza em função da temperatura demonstra que quanto maior for minha temperatura menor será a tensão suportada, mas havendo um decréscimo de temperatura eu tenho um aumento do meu LRT. A influência do calor na propriedade mecânica do aço inoxidável AISI 304 foi observado também por; Antunes e Antunes (2007) e Santos e Andrade (2008) que constataram sua reação quando ensaiado com temperaturas altas e baixas. Contudo pode se notar sua relação direta com o módulo de elasticidade e o ponto de fusão do material. Segundo, Amauri et al (2000c) as forças de ligação entre os átomos e o módulo de elasticidade são maiores para ligas com temperaturas de fusão elevadas.

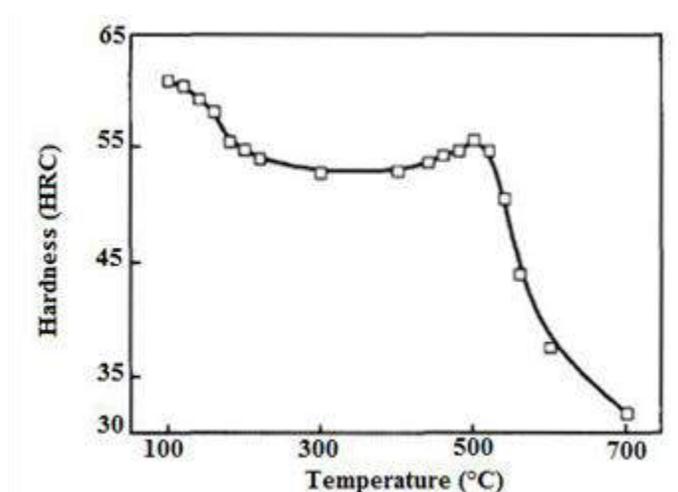


Figura 5. Gráfico de temperatura em função da dureza do AISI 304 (Essoussi, 2019).

4. CONCLUSÕES

O atual trabalho tinha como principal objetivo a avaliação e quantificação das propriedades mecânicas do aço inoxidável austenítico AISI 304 bem como a interpretação das informações obtidas via ensaio de tração, visando que a junção de suas variações em relação a temperatura e sua direção de laminação entraram também como fator de avaliação devido a sua capacidade isotrópica como resultado dessas mudanças, o corpo de prova se mostrou reativo quando imposto a baixas e altas temperaturas se notou também que dependendo dessa temperatura era visível os níveis de encruamento do material, alguns artigos também tinham discordância em relação a velocidade e isso também foi observado afim de tornar o artigo mais completo já que se trata de uma revisão bibliográfica.

- Devido a interpretação da curva tensão σ -deformação ϵ o material se mostrou com uma boa tenacidade visto que a sua variação mínima ficou em torno de 500 e 600 Mpa, mas se anotou valores superiores para gráficos convencionais, o material possui um bom LRT quando comparados a ferros com maior teor de carbono;
- Em comparação a todos os as curvas se observou que o aço inoxidável austenítico e pouco resiliente, ou seja, sua zona de resiliência se mostrou quase paralela ao eixo Y demonstrando que a sua capacidade de deformação elástica é baixa, já que a sua área abaixo do gráfico da fase elástica quase não existe podendo assim dizer que o seu módulo de elasticidade é pequeno indicando sua baixa rigidez e alta deformação quando em comparação com aços de maiores teores de carbono.
- Quanto a sua direção de laminação o material se mostrou fortemente anisotrópico, ou seja, suas propriedades mecânicas se alteraram em função da direção de laminação alterando assim seu LRT, LE, e sua deformação.
- O material se caracteriza com uma boa ductilidade devido a deformações de engenharia de 70 a 60%, mas quando avaliado em uma curva verdadeira se mostrou com deformações na ordem de 12 a 50% com valores de tensão entre 250 ou até 100 Mpa.
- O material se mostrou com curvas opostas quando exposto a altas e baixas temperaturas, quando deformado a frio o AISI 304 cria fases martensíticas aumentando sua capacidade de tensão e a diminuição de sua deformação, mas quando essa temperatura baixa se mantém constante mas o material continua em deformação o que causa essas fases são a própria deformação contínua, apesar de já sofrer deformação do processo de conformação mecânica a deformação a tração dos grãos se mostraram menores do que em um ensaio mecânico de flexão.
- Quanto as diferentes velocidades de ensaio ou velocidade de deformação plástica se notou que não houve tantas mudanças em suas propriedades quando as mesmas não são críticas, mas se observou que com o aumento de velocidade do ensaio o material

possuía regiões crescente de não uniformidade contribuindo para uma deformação de forma descontrolada.

- O aço inoxidável AISI 304 somente se comportou de forma inusitada quando o valor chegou em índices críticos de velocidade em ensaio, reduzindo de forma drástica sua deformação plástica. Quando submetido a fazes críticas sua deformação plástica se converte em calor dissipando se por toda região do corpo causando o amaciamento térmico reduzindo assim o seu encruamento.

5. REFERÊNCIAS

Antunes, A.E.B.; Antunes, L.M.D., 2007. **Comportamento plástico do aço inoxidável austenítico em baixa temperatura**. *Rem: Revista Escola de Minas*, Vol.60, No.1, pp. 141- 147.

Essoussi, H. **Heat treatment effect on mechanical properties of AISI 304 austenitic stainless steel**. In *12° INTER-ENG - The 12th International Conference Interdisciplinarity in Engineering*. Tîrgu Mures, Roménia. *Procedia Manufacturing*. Vol. 32, pp. 883-888 (2019).

FAVORIT, 2019. **Aços especiais**. Aços Favorit Distribuidora Ltda, Cachoeirinha, Brasil.

Garcia, A.; Spim, J.A.; Santos, C.A., 2000. **Ensaio dos materiais**. LTC, Campinas, Brasil.

Marconi, M.A.; Lakatos, E.M., 2011. **Metodologia do trabalho científico: procedimentos básicos, pesquisa bibliográfica, projeto e relatório publicações e trabalhos científicos**. Atlas, São Paulo, 7ª edição.

Purper, B.V., 2016. **Caracterização das propriedades mecânicas e magnéticas de um aço inoxidável AISI 304**. Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, Brasil.

Rocha, J.E.S., 2005. **Influência da velocidade de deformação nas propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 304**. Master's thesis, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

Santos, A.D.L.; Marinho, D.R.; Araújo Júnior, F.P.; Horiuchi, L.N.; Santos, H.L.B.O.; Oliveira, M.H.M., 2016. **Análise metalográfica do aço inox 304 submetido a diferentes esforços mecânicos**. In *22° CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*. Natal, Brasil.

Santos, J.J., 2015. **Estudo experimental de ligações aparafusadas de aço inoxidável submetidas à tração**. Ph.D thesis, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Santos, T.F.A.; Andrade, M.S., 2008. **Avaliação dilatométrica da reversão das martensitas induzidas por deformação em um aço inoxidável austenítico do tipo ABNT 304**. *Revista Matéria*, Vol.13, No.4, pp.587-596.

Tomasi, C.; Medeiros, J.B., 2008. **Comunicação científica: normas técnicas para redação científica**. Atlas, São Paulo.

Zheng, C.; Yu, W. **Effect of low temperature on mechanical behavior for an AISI 304 austenitic stainless steel**. *Materials Science Engineering*. Vol. A 710, pp. 359–365 (2018).

Capítulo 10

ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL ARGILOSO PARA APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

WÊNIO F HARÁ ALENCAR BORGES¹, LUIZ HENRIQUE PORTELA DE ABREU², RENAN MATOS MONÇÃO³, RÔMULO RIBEIRO MAGALHÃES DE SOUSA⁴, ANDRÉ SALES AGUIAR FURTADO⁵, FILIPI MACIEL DE MELO⁶, IGOR ANTONIO DE OLIVEIRA CARVALHO⁷

RESUMO

Este trabalho apresenta a caracterização físico-mecânica de uma amostra de argila por meio da análise de ensaios preliminares. Apresenta-se a caracterização da matéria-prima da argila e os resultados dos ensaios para a determinação do percentual de umidade de extrusão, resíduo, retração linear à temperatura de 110°C e após queima, e de determinação da tensão de ruptura à flexão após secagem a 110°C e após queima a 950°C, perda ao fogo, absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente. Além disso, identificou-se as cores da argila após secagem e após a queima a 950°C. Após análise dos resultados, determinou-se a possível utilização da argila analisada para a produção de telhas.

Palavras-chave: Argila. Caracterização. Ensaios preliminares.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento das matérias primas, no tocante às suas características, é de suma importância para a obtenção dos produtos cerâmicos, tendo em vista os padrões de qualidade preestabelecidos pelas empresas.

O bom desempenho das etapas do processo cerâmico depende muito dos controles realizados nas matérias primas. Esses controles se iniciam com o sistema de amostragem, que consiste nos procedimentos da obtenção da amostra, compreendendo a secagem natural das argilas, a amostragem, o quarteamento e terminam com os ensaios cerâmicos preliminares (Dondi, 2006).

¹Mestre em Engenharia Mecânica (UFPE), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Pedreiras, Pedreiras-MA.

E-mail: wenio.borges@ifma.edu.br

²Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais (UFPI), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM, Campus Manaus Distrito Industrial, Manaus-AM.

E-mail: luizhabreu92@gmail.com

³Mestrando em Ciência e Engenharia dos Materiais (UFPI), Universidade Federal do Piauí – UFPI, Teresina-PI.

E-mail: renanmatos962010@gmail.com

⁴Doutor em Ciência e Engenharia dos Materiais (UFRN), Universidade Federal do Piauí – UFPI, Teresina-PI.

E-mail: romulorms@gmail.com

⁵Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais (UFPI), Universidade Federal do Piauí – UFPI, Teresina-PI.

E-mail: salesandre7@gmail.com

⁶Mestre em Engenharia Mecânica (UFPB), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Timon, Timon-MA.

E-mail: filipi.melo@ifma.edu.br

⁷Mestre em Engenharia de Materiais (IFPI), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, Campus Timon, Timon-MA.

E-mail: igor.carvalho@ifma.edu.br

O processo cerâmico será bem-sucedido, se for amparado com a garantia da qualidade das matérias-primas, resultando em produtos de ótima qualidade, com custos de fabricação reduzidos.

Os ensaios cerâmicos preliminares visam estudar as características físicas e mecânicas de um material para definir sua aplicação na indústria e prever os usos individuais de matérias primas a partir dos ensaios cerâmicos simples (Rêgo, 2010; Norton, 1973).

Os laboratórios que estudam matérias primas são frequentemente solicitados para estudar argilas desconhecidas, prevendo se podem ou não, ter uso industrial. São utilizados, tanto para matérias primas plásticas (argilas, caulins, etc.) como para composições cerâmicas (massas de revestimento, sanitários, etc.) e através dos resultados dos ensaios podem-se classificar, por comparação, as matérias primas quanto à sua aplicabilidade em cerâmica.

Esse procedimento tem como principais objetivos prever, adaptar ou sugerir novos usos para matérias-primas que são usadas apenas para uma finalidade industrial e comparar matérias-primas já utilizadas, com novas matérias-primas, visando substituição e caracterizar massas cerâmicas. Como principal vantagem, os ensaios preliminares utilizam uma abordagem cerâmica comum e equipamentos não sofisticados. Assim, o presente trabalho busca, através de testes preliminares, realizar uma caracterização de uma amostra de argila para aplicações industriais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para se dar início aos ensaios preliminares foi colhida uma porção de material ou um grupo de unidades, retirada de uma grande massa ou conjunto que, posteriormente, foi reduzida para amostras menores através do processo de quarteamento.

Logo após, coletou-se aproximadamente 10 kg de uma amostra de material argiloso que foi colocada em um local limpo, para a realização de uma homogeneização das amostras. Logo, fez-se um monte em forma de cone, espalhou-se o monte com uma pá, repartiu-se o material espalhado em quatro partes iguais em formato de cruz, sendo descartadas duas dessas quatro partes, juntou-se novamente as partes remanescente e reiniciou-se o processo a partir da homogeneização até a obtenção de uma amostra representativa, que corresponda a uma quantidade de argila suficiente para realização dos ensaios laboratoriais (SENAI, 2006).

Em seguida, foi preparado 12 amostras de corpo-de-prova para realização dos ensaios de laboratórios. Os corpos-de-prova foram conformados por extrusão, com vácuo de 25 pol./Hg, medindo aproximadamente 12,0 cm x 5,0 cm x 1,5 cm (comprimento, largura e espessura, respectivamente) e queimados a uma elevada temperatura (950°C) para caracterizar as amostras. Depois disto, os corpos-de-prova foram secos em estufa a 110°C. A queima foi realizada em forno de laboratório na temperatura de 950°C. A taxa de aquecimento foi de 3°C/min. e o tempo de permanência na temperatura de patamar foi alcançado no tempo de 60 min. O resfriamento foi realizado desligando-se o forno e mantendo-se os corpos-de-prova no seu interior. Destas

amostras, 6 foram selecionadas para a realização dos ensaios no Laboratório de Ensaios de Materiais do Instituto Federal do Piauí (IFPI).

2.1. Formulação das amostras

A formulação da massa cerâmica foi feita com teor de 100% em peso de massa da argila identificada como “A1”, conforme a Tab. 1.

Tabela 1. Formulação da massa. Fonte: Autores, 2020.

| Formulação da massa | Concentração em peso (%) |
|---------------------|--------------------------|
| | Argila “A1” |
| A1 | 100 |

Para a composição das massas foi utilizada uma balança digital com resolução de 0,1g. Em seguida, adicionou-se água às formulações em 20% do peso total, em seguida misturou-se cada formulação até obter homogeneidade da massa, depois foi colocada em recipientes plásticos vedados por um período de 24 horas para melhor distribuição da umidade entre as partículas da massa cerâmica e evitar perda significativa de umidade.

2.2. Preparação dos corpos de prova

Inicialmente as amostras foram secas ao ar livre e moídas em moinho do tipo forrageiro. Entre os métodos usuais de preparação de corpos de prova estão: extrusão, prensagem e colagem. Neste trabalho, os corpos-de-prova foram conformados por extrusão, com vácuo de 25 pol./Hg, medindo aproximadamente 12,0 x 5,0 x 1,5 cm (comprimento, largura e espessura, respectivamente). Os ensaios cerâmicos realizados nos corpos-de-prova foram feitos de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

2.2.1. Confecção de corpos de prova por extrusão

Este processo é usado visando prever a utilização de uma argila na fabricação de produtos de cerâmica vermelha como telhas e blocos (Rêgo, 2010). Para a preparação deve-se utilizar a amostra previamente quarteada e seca; tritura-la através de moinhos de martelo, galga ou almofariz; peneirar ± 1 kg de material em #48 (0,297mm de abertura); umedecer o material adicionando de 20 a 22% de umidade (dependendo da plasticidade); deixar descansar por 24 horas dentro de um recipiente – forma de plástico ou alumínio (abafado com saco plástico); após este período, passar pela extrusora (Fig. 1). O vácuo deverá estar em torno de 25 polegadas de mercúrio (pol./mg) até obter a plasticidade adequada.



Figura 1. Extrusora – Laboratório de ensaios cerâmicos/IFPI.

Fonte: Autores, 2020.

2.3. Secagem e queima dos corpos de prova

Após a obtenção dos corpos de prova, primeiramente o comprimento foi medido por paquímetro analógico da marca *Mitutoyo*, com precisão 0,02 mm e foram pesados em balança digital do laboratório de ensaios do IFPI; em seguida, secos durante 24 horas à temperatura ambiente (35°C) e 24 horas em estufa a 110°C, até obter massa constante. Seguida a secagem, os corpos de prova tiveram novamente medidos o comprimento e o peso para obtenção da retração linear de secagem e umidade de extrusão (Fig. 2). Foi possível se verificar também após secagem que os corpos-de-prova não apresentaram trincas ou defeitos que podem danificá-los na etapa de queima.



Figura 2. Corpos de prova após secagem a 110°C.

Fonte: Autores, 2020.

A etapa de queima dos corpos de prova foi realizada em forno elétrico com ciclo total de 4 horas (Fig. 3). Foi utilizada a temperatura máxima de 950°C. A taxa de aquecimento foi de 3°C/min em cada queima, e o patamar de temperatura máxima foi alcançado no tempo de 60

minutos. O resfriamento ocorreu de forma natural, com as amostras dentro do forno desligado, até alcançar a temperatura ambiente.



Figura 3. Corpos de prova após queima a 950°C.

Fonte: Autores, 2020.

2.4. Distribuição Granulométrica

A análise da distribuição das dimensões dos grãos objetiva determinar uma curva granulométrica. Para tal realização, uma amostra de material granular é submetida a peneiramento em uma série-padrão de peneiras, cuja abertura de malhas possuem uma sequência pré-determinada (Tab. 2).

Em seguida, determina-se a massa de material retido em cada peneira e os resultados são plotados em um gráfico, onde o eixo das abscissas corresponde à abertura de malha, em escala logarítmica, e as ordenadas, à percentagem do material que passa (Fig. 4). Esse ensaio é padronizado no Brasil pela NBR 7181 (ABNT, 2016).

Tabela 2. Análise de distribuição granulométrica. Fonte: Autores, 2020.

| Ensaio de distribuição granulométrica | | | | | |
|---------------------------------------|---------------|---------------------|--------------|-------------|------------|
| Nº da peneira | Abertura (mm) | Material retido (g) | % Retida | % Acumulada | % Passante |
| 10 | 2,00 | 0,22 | 1,1 | 1,1 | 98,9 |
| 30 | 0,60 | 0,76 | 3,8 | 4,9 | 95,1 |
| 50 | 0,30 | 1,28 | 6,4 | 11,3 | 88,7 |
| 100 | 0,15 | 4,63 | 23,2 | 34,5 | 65,5 |
| Fundo | 0,15 | 13,06 | 65,5 | 100 | 0 |
| | Σ | 19,95 | 100,0 | | |

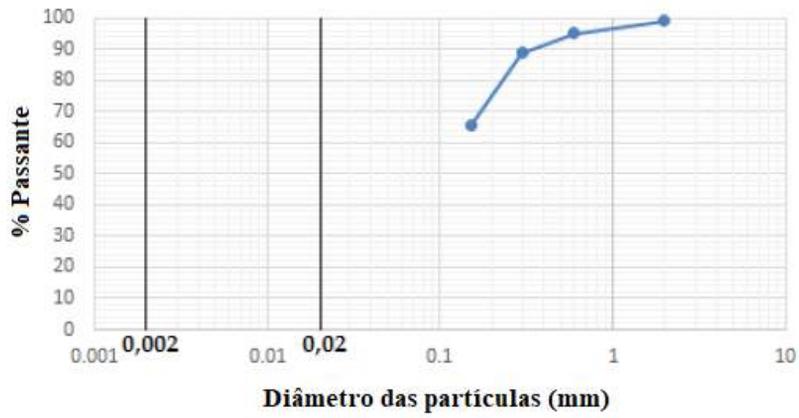


Figura 4. Gráfico da distribuição granulométrica.

Fonte: Autores, 2020.

Tabela 3. Composição granulométrica dos produtos de cerâmica vermelha. Fonte: Autores, 2020.

| Regiões Tipos de produtos | Composição granulométrica (%) | | |
|---|-------------------------------|----------------------|--------------------|
| | < 2 μm | 2 a 20 μm | > 20 μm |
| A. Materiais de qualidade com dificuldade de produção | 40 a 50 | 20 a 40 | 20 a 30 |
| B. Telhas | 30 a 40 | 20 a 50 | 20 a 40 |
| C. Tijolos furados | 20 a 30 | 20 a 55 | 20 a 50 |
| D. Tijolos maciços | 15 a 20 | 20 a 55 | 20 a 55 |

Quando os solos apresentam granulometria muito fina, menor que 0,075 mm, essa porcentagem é tratada de forma diferenciada através do ensaio de sedimentação, cujos detalhes podem ser vistos na mesma NBR 7181 (ABNT, 2016). Essa operação visa determinar a distribuição granulométrica dos finos através da velocidade de queda das partículas do solo em um meio líquido, tomando como base a Lei de Stokes, que correlaciona a velocidade de queda das partículas esféricas com o seu diâmetro.

Para a amostra de argila estudada, pretende-se, portanto, utilizá-la para a produção de telhas, logo, deve-se possuir um valor entre 20 a 40%, em sua composição granulométrica.

2.5. Índice de plasticidade

Uma das maneiras de se caracterizar o comportamento dos solos argilosos sob o ponto de vista da engenharia é por meio de análises indiretas, baseada no comportamento do solo na presença de água. Deste modo, o teor de umidade (%) de uma amostra constitui-se um fator determinante nos cálculos que serão realizados. A umidade é a relação, em porcentagem, entre o peso da água e do solo seco. Para determiná-la, pesa-se o solo no seu estado natural, seca-se em estufa a 105°C até a constância de peso e pesa-se novamente. Tendo-se o peso das duas fases, a umidade é calculada.

2.5.1. Determinação da água de amassamento

Na determinação da água de amassamento, pesou-se 60g da amostra preparada, em seguida, amassou-se a amostra com as mãos até homogeneizá-la e deixá-la de ser pegajosa (não grudar nas mãos). Logo após, pesou-se duas tijelinhas de alumínio e anotou-se o peso. Foram colocadas as amostras dentro das tijelinhas e pesadas as massas úmidas (M_u). Identificou-se as tijelinhas: água de amassamento, código da amostra, peso da tijelinha e peso da amostra. Secou-se em estufa a 110°C por 2 horas, pesou-se as amostras secas e anotou-se os pesos (SENAI, 2005).

Calculou-se a água de amassamento pela Eq. 1:

$$\text{Água de amassamento} = \frac{M_u - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde M_u é a massa úmida e M_s é a massa seca.

O resultado de água de amassamento para o material estudado “Argila A1” é mostrado na Tab. 4.

Tabela 4. Água de amassamento. Fonte: Autores, 2020.

| Amostra | Peso úmido – PU (g) | Peso seco – PS (g) | Umidade – U (%) |
|---------|---------------------|--------------------|-----------------|
| A1 | 60 | 49,30 | 21,70 |
| A1 | 60 | 49,66 | 20,82 |
| A1 | 60 | 49,16 | 22,05 |
| A1 | 60 | 48,70 | 23,20 |

2.5.2. Determinação do limite de liquidez (NBR 6459)

Há mais de noventa anos, o sueco Atterberg, engenheiro químico, pesquisador do comportamento dos solos sob o aspecto agrônomo, dividiu os valores de umidade que uma argila pode apresentar em limites correspondentes ao estado aparente do material. Esses são: limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) (Norton, 1973).

Esse assunto foi adaptado e padronizado mais tarde pelo professor de mecânica dos solos chamado Arthur Casagrande, que projetou um aparelho para realização do ensaio a fim de determinar o limite de liquidez (LL) (Rêgo, 2010). O equipamento consiste em um prato de latão, em forma de concha, sobre um suporte de ebonite. Quanto ao ensaio, esse consta, primeiramente, do destorroar e homogeneizar a amostra do solo (no caso, argila). Em seguida, a amostra umidificada é colocada no recipiente do aparelho, faz-se um sulco longitudinal com a ajuda de um cinzel e, por meio de um excêntrico, imprime-se ao prato, repetidamente, quedas de altura de 1 cm e intensidade constante. Repete-se a operação com outros graus de umidade. Os números de golpes necessários para provocar o fechamento do sulco são registrados. Os resultados são plotados num gráfico. Ao determinar o teor de umidade correspondente a 25

golpes, encontra-se, automaticamente, o LL. Este procedimento é empregado em todo o mundo e normatizado pela NBR 6459 (ABNT, 1984).

Calculou-se a limite de liquidez pela Eq. 2:

$$\text{Limite de liquidez} = \frac{M_u - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde M_u é a massa úmida e M_s é a massa seca.

O resultado do limite de liquidez para o material estudado “Argila A1” é mostrado na Tab. 5 e plotado no gráfico da Fig. 5.

Tabela 5. Limite de liquidez. Fonte: Autores, 2020.

| Amostra | Pontos | Nº de golpes | PU (g) | PS (g) | LL (%) |
|---------|--------|--------------|--------|--------|--------|
| A1 | 1º | 92 | 2,18 | 1,77 | 23,16 |
| A1 | 2º | 62 | 1,09 | 0,85 | 28,24 |
| A1 | 3º | 59 | 0,81 | 0,60 | 35,00 |
| A1 | 4º | 38 | 1,34 | 1,01 | 32,67 |
| A1 | 5º | 32 | 1,15 | 0,91 | 26,67 |
| A1 | 6º | 20 | 0,98 | 0,77 | 27,27 |

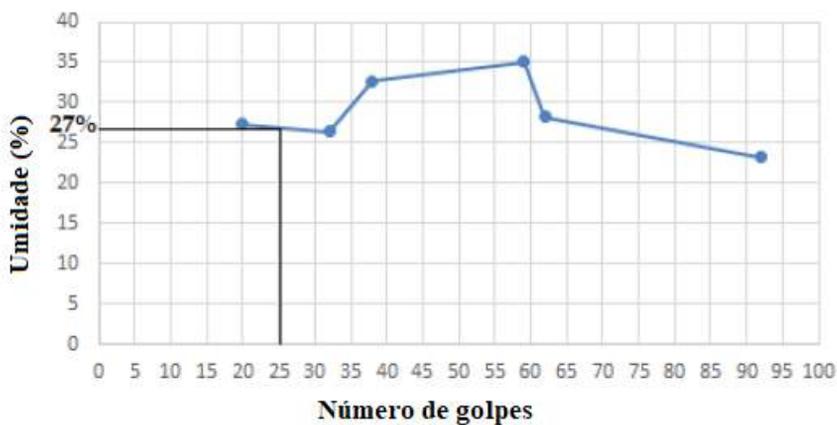


Figura 5. Gráfico de limite de liquidez.

Fonte: Autores, 2020.

2.5.3. Determinação da água de esfarelamento ou limite de plasticidade (NBR 7180)

Na determinação da água de esfarelamento ou limite de plasticidade, pesou-se 10g da amostra e rolhou-se a sobre a mesa, de superfície polida, com pressão suficiente na palma da mão para lhe dar forma de cilindro, tendo aproximadamente 100 mm de comprimento por 3 mm de diâmetro. Quando a amostra atingiu as dimensões citadas, sem se fragmentar, amassou-as com os dedos, e repetiu-se o procedimento, até quando não se conseguiu mais rolar sobre a mesa (se fragmentar). Em seguida, transferiu-se o material para uma tijelinha de alumínio previamente pesada, e pesou-se a tijelinha com a amostra material e anotou-se o peso. Identificou-se a

cápsula: água de esfarelamento, código da amostra, peso da tijelinha e peso da amostra. Secou-se em estufa a 110°C por 2 horas, pesou-se a amostra seca e anotou-se o peso (ABNT, 1984).

Calculou-se o limite de plasticidade pela Eq. 3:

$$\text{Limite de plasticidade} = \frac{M_u - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad (3)$$

Onde M_u é a massa úmida e M_s é a massa seca.

O resultado do limite de plasticidade para o material estudado “Argila A1” é mostrado na Tab. 6.

Tabela 6. Limite de plasticidade. Fonte: Autores, 2020.

| Amostra | PU (g) | PS (g) | LL (%) |
|---------|--------|--------|--------|
| A1 | 10 | 8,15 | 22,69 |
| A1 | 10 | 7,95 | 25,78 |
| A1 | 10 | 7,94 | 25,94 |
| A1 | 10 | 8,11 | 23,30 |

2.5.4. Índice de plasticidade

O índice de plasticidade de um solo (IP) é definido pela diferença entre os limites de liquidez e plasticidade:

$$\text{Índice de plasticidade} = LL - LP \quad (4)$$

Onde IP é o índice de plasticidade, LL é o limite de liquidez e LP é o limite de plasticidade.

O resultado do índice de plasticidade para o material estudado “Argila A1” é mostrado na Tab. 7.

Tabela 7. Índice de plasticidade. Fonte: Autores, 2020.

| Amostra | LL (%) | LP (%) | IP (%) |
|--------------|--------|--------|-------------|
| A1 | 23,16 | 22,69 | 0,47 |
| A1 | 28,24 | 25,78 | 2,46 |
| A1 | 35,00 | 25,94 | 9,06 |
| A1 | 32,67 | 23,30 | 9,37 |
| Média | | | 5,34 |

Ele determina a zona em que certo terreno se encontra no estado plástico, fornecendo um critério para se ajuizar do caráter argiloso de um solo, ou seja, quanto maior o IP, mais plástica será a amostra. Sabe-se que uma pequena porcentagem de matéria orgânica eleva o valor de LP, sem elevar simultaneamente o do LL. Tais solos apresentam, pois, baixos valores para IP. Conhece-se, também, que as argilas são tanto mais compressíveis quanto maior for o IP. Segundo Caputo (1998), os solos poderão ser classificados em, Tab. 8:

Tabela 8. Classificação plástica dos solos. Fonte: Caputo, 1998.

| Classificação | Intervalo de IP |
|----------------------|-----------------|
| Fracamente plásticos | $1 < IP < 7$ |
| Mediamente plásticos | $7 < IP < 15$ |
| Altamente plásticos | $IP > 15$ |

As argilas plásticas (denominadas industrialmente por “argilas gordas”) apresentam granulometria muito fina, isto é, grãos abaixo de 2 μm . Como consequência, o processamento de uma composição contendo excessivamente este tipo de argila torna-se complicado. Para facilitar o processo de fabricação, são introduzidas outras argilas (denominadas por “argilas magras”), que apresentam um maior teor de impurezas misturadas aos argilominerais, reduzindo a plasticidade da massa. Neste caso, há necessidade de se fazer uma mistura entre estas argilas, juntamente com os materiais não-plásticos moídos, a fim de se obter uma distribuição adequada ao processamento e às características de qualidade do produto desejado.

Para a amostra de argila analisada, pode-se afirmar que é uma argila mediamente plástica por possuir um índice de plasticidade igual a 5,34 (Sanchez-Munõz, 2002), não sendo considerada, portanto, nem uma “argila gorda”, nem uma “argila magra”.

2.6. Ensaio tecnológicos

Para a caracterização das amostras, foram selecionados 6 corpos de prova para se determinar (Norton, 1973):

- ✓ Umidade de extrusão;
- ✓ Retratação linear após a secagem;
- ✓ Retratação linear após a queima;
- ✓ Perda ao fogo;
- ✓ Absorção d'água;
- ✓ Porosidade aparente;
- ✓ Massa específica aparente;
- ✓ Cor de queima;
- ✓ Tensão de ruptura à flexão;
- ✓ Verificação de elementos químicos na argila.

2.6.1. Umidade de extrusão

A umidade de extrusão é calculada levando-se em consideração o peso úmido e o peso seco.

Calculada em porcentagem pela Eq. 5:

$$\% U = \frac{M_u - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad (5)$$

Onde % U é o percentual de umidade, M_u é a massa úmida e M_s é a massa seca.

A umidade de extrusão de corpos de prova varia de 18 a 31%.

2.6.2. Determinação da retração linear após secagem e queima

Este ensaio é regido pelo método brasileiro MB-305 (ABNT, 1987). A retração linear ou contração avalia o encolhimento das massas argilosas quando perdem águas coloidal e residual durante o processo de secagem e queima.

Pela contração pode-se estimar a composição granulométrica da argila, isto é, maior contração indica granulometria muito fina que, por sua vez, exige mais água para o amassamento. Neste ensaio, avalia-se o encolhimento das massas argilosas, quando perdem água coloidal e residual, durante o processo de secagem e queima.

- a) **Retração linear após secagem:** A alteração das dimensões após secagem é consequência da eliminação da água usada na conformação do produto, portanto, quanto maior a quantidade de água, maior será a retração.

$$\% \text{ RI}_s = \frac{C_i - C_f}{C_i} \cdot 100 \quad (6)$$

Onde (% RI_s) é a porcentagem de retração linear após secagem à temperatura T; C_i é o comprimento inicial do corpo de prova, medido logo após a conformação; e C_f é o comprimento final do corpo de prova, medido após a secagem à temperatura T, que em geral é 110°C.

- b) **Retração linear após a queima:** É calculada em porcentagem pela Eq. 7:

$$\% \text{ RI}_q = \frac{C_i - C_f}{C_i} \cdot 100 \quad (7)$$

Onde (% RI_q) é a porcentagem de retração linear após queima à temperatura T; C_i é o comprimento inicial do corpo de prova, medido 110°C; e C_f é o comprimento final do corpo de prova, medido após a queima à temperatura T°C.

2.6.3. Perda ao fogo

É a diminuição de massa da amostra seca durante a queima. Calculada em porcentagem pela Eq. 8:

$$PL = \frac{M_i - M_f}{M_i} \cdot 100 \quad (8)$$

Onde PL é a perda ao fogo, M_i é a massa do corpo de prova após secagem completa a 110°C (g) e M_f é a massa do corpo de prova, medido após queima a T °C (g).

Os valores de referência aceitos na prática industrial são entre 6 e 16%.

2.6.4. Absorção d'água

É o quociente da massa de água absorvida pelo corpo de prova, saturado em água, pela massa do corpo de prova seco.

Calculada em porcentagem pela Eq. 9:

$$\% AA = \frac{M_u - M_s}{M_u} \cdot 100 \quad (9)$$

Onde AA é a absorção d'água (%); M_u é a massa úmida (g) e M_s é a massa seca (g).

O índice de absorção d'água deve ser inferior a 20%.

2.6.5. Volume aparente

É o volume do material sólido, o volume dos poros abertos e fechados do respectivo corpo de prova.

Calculado pela Eq. 10:

$$V_a (\text{cm}^3) = M_u - M_s \quad (10)$$

Onde V_a é o volume aparente; M_u é a massa úmida e M_i é a massa imersa.

2.6.6. Porosidade aparente

É o quociente do volume de poros abertos do corpo de prova pelo seu respectivo volume aparente.

Calculada em porcentagem pela Eq. 11:

$$\% P_a = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \cdot 100 = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \cdot 100 \quad (11)$$

Onde P_a é a porosidade aparente; M_u é a massa úmida, M_s é a massa seca e M_i é a massa imersa.

2.6.7. Massa específica aparente ou densidade aparente

É o resultado da relação entre a massa do corpo de prova seco pelo seu volume aparente. É calculada pela Eq. 12:

$$\text{MEA (g/cm}^3\text{)} = \frac{M_s}{V_a} = \frac{M_s}{M_u - M_i} \quad (12)$$

Onde MEA é a massa específica aparente; V_a é o volume aparente; M_s é a massa seca; M_u é a massa úmida e M_i é a massa imersa.

2.6.8. Tensão de Ruptura à Flexão (TRF)

A resistência mecânica é uma das propriedades das argilas, que tem grande interesse para o ceramista, pois possibilita o processamento das peças cerâmicas, sem que se quebrem. Neste caso, trata-se de um dos ensaios mais rotineiros, que é a resistência mecânica a cru e após a queima dos corpos de prova (SENAI, 2006).

A TRF é um importante parâmetro para verificação da qualidade de um produto cerâmico, que está relacionado com os valores da AA, PA e MEA.

Determina-se a TRF através do ensaio em flexão de três pontos. É calculada pela Eq. 13:

$$\text{TRF (kg/cm}^2\text{)} = \frac{N \cdot P}{b \cdot h^2} \quad (13)$$

Onde TRF é a tensão de ruptura à flexão; P é a carga (em kgf) atingida no momento da ruptura; N é o número de pesos; b é a largura (em cm) do corpo de prova; h é a altura (em cm) do corpo de prova. Observação: $\text{Kg/cm}^2 = 0,098\text{MPa}$.

2.6.9. Classificação preliminar de argilas para uso cerâmico com base nas cores apresentadas após a queima.

Segundo SENAI (2005), as classificações das argilas com base nas cores ficam condicionadas ao exposto na seguinte Tab. 9:

Tabela 9. Classificação das argilas com base nas cores. Fonte: SENAI, 2006.

| Grupo cerâmico | Cores dos corpos de prova | |
|-------------------|---|--|
| | Após secagem | Após queima |
| Cerâmica vermelha | Vermelha, marrom, verde, creme, cinza, outras cores, exceto: branca, alaranjada, preta e cinza avermelhada. | Vermelhas com diversas tonalidades: amarela, marrom claro. |

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Umidade de extrusão

Os resultados das umidades de extrusão das 6 amostras selecionadas são mostrados na Tab. 10 e na Fig. 6.

Tabela 10. Umidade de extrusão. Fonte: Autores, 2020.

| Nº de corpo de prova | PU (g) | PS (g) | U (%) |
|----------------------|--------|--------|--------------|
| 1 | 143,64 | 122,08 | 17,66 |
| 2 | 142,10 | 120,05 | 18,37 |
| 3 | 135,03 | 115,76 | 16,65 |
| 4 | 141,37 | 120,26 | 17,55 |
| 5 | 144,65 | 123,91 | 16,73 |
| 6 | 139,75 | 118,16 | 17,67 |
| Média | | | 17,44 |

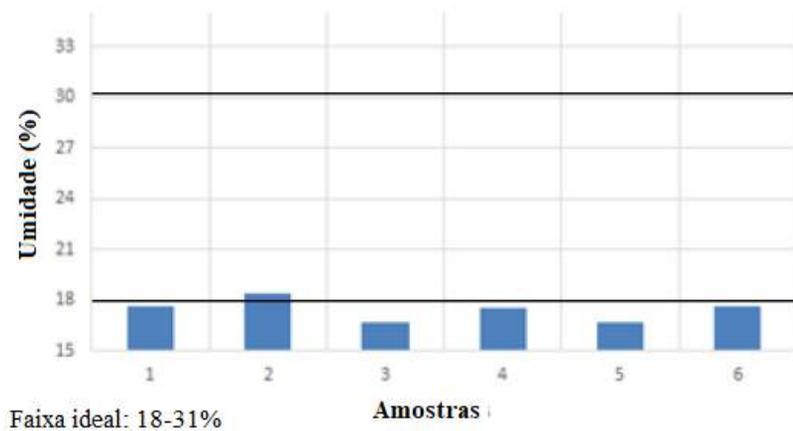


Figura 6. Umidade de extrusão.

Fonte: Autores, 2020.

As umidades médias de extrusão das amostras apresentaram valores variando de 16,65 a 18,37. Os resultados encontrados na umidade de extrusão não estão todos de acordo com as normas vigentes, regulamentadas pela SENAI (2005), que indica que faixa ideal da umidade de extrusão é de aproximadamente 18% a 31%. Porém, os valores estão bem próximos do recomendável, em uma média de 17,44%.

3.2. Retração linear a 110°C

A Tab. 11 apresenta os valores obtidos e a Fig. 7 mostra o resultado encontrado da retração linear após secagem (110°C) para as amostras estudadas.

Após as tabulações dos dados das retrações lineares, após secagem das amostras cerâmicas, verificamos que todas as formulações ficaram dentro da variação aceitável em todas as formulações e temperaturas estudadas, que de acordo com Dondi (2006), a variação ótima é

de 5% a 8% e a variação aceitável é 3% a 10%. Portanto, estão todas dentro do padrão recomendável.

Tabela 11. Retração linear a 110°C. Fonte: Autores, 2020.

| Nº de corpo de prova | Comp. inicial (mm) | Comp. final (mm) | Retração – 110°C (%) |
|----------------------|--------------------|------------------|----------------------|
| 1 | 100 | 93,95 | 6,05 |
| 2 | 100 | 94,20 | 5,08 |
| 3 | 100 | 94,97 | 5,03 |
| 4 | 100 | 93,83 | 6,17 |
| 5 | 100 | 95,09 | 4,91 |
| 6 | 100 | 94,63 | 5,37 |
| Média | | | 5,44 |

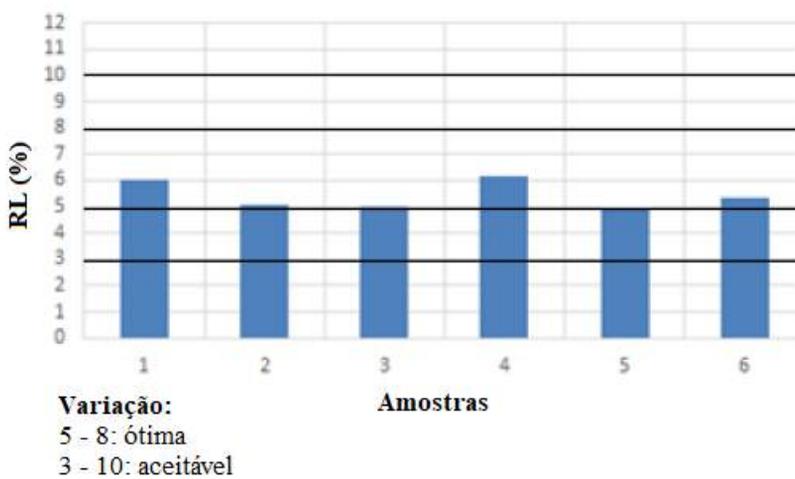


Figura 7. Retração linear a 110°C.

Fonte: Autores, 2020.

3.3. Perda ao fogo

A Tab. 12 apresenta os valores obtidos e a Fig. 8 mostra os resultados encontrados da PF nas formulações apresentadas.

A perda ao fogo é a diminuição do peso até um valor constante, que indica uma perda de material devido ao aumento de temperatura. Basicamente indica o teor de matéria orgânica presente na argila e a quantidade de gás e vapor que são formados durante o aquecimento, resultante da decomposição dos carbonatos.

Tabela 12. Perda ao fogo. Fonte: Autores, 2020.

| Nº de corpo de prova | M _s (g) | M _q * (g) | Perda ao fogo (%) |
|----------------------|--------------------|----------------------|-------------------|
| 1 | 122,08 | 108,90 | 10,80 |
| 2 | 120,05 | 111,77 | 6,90 |
| 3 | 115,76 | 109,08 | 5,77 |
| 4 | 120,26 | 112,98 | 6,05 |
| 5 | 123,91 | 114,92 | 7,26 |
| 6 | 118,16 | 109,57 | 7,27 |
| Média | | | 7,34 |

*M_q = massa queimada.

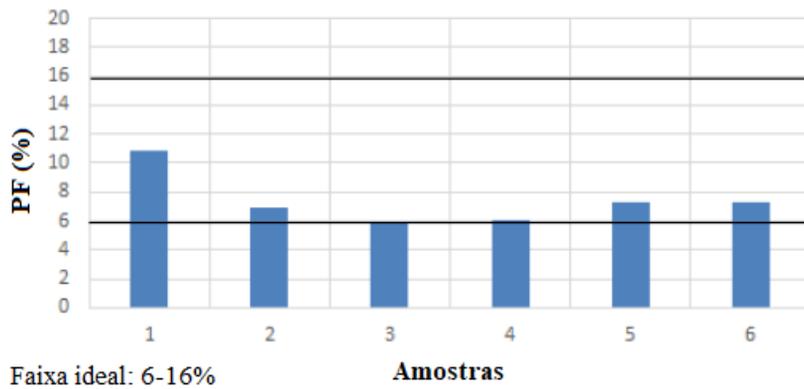


Figura 8. Perda ao fogo.

Fonte: Autores, 2020.

A faixa ideal da perda ao fogo é de 6% a 16% (SENAI, 2006). Como a média das amostras selecionadas foi igual a 7,34, pode-se afirmar que o resultado está dentro do padrão recomendado.

3.4. Retração linear após queima

A Tab. 13 apresenta os valores obtidos e a Fig. 9 mostra os resultados encontrados da RL nas formulações apresentadas.

As amostras (massa cerâmica) retraíram à medida que se aumentou a temperatura até 950°C. Este comportamento é atribuído ao fechamento da porosidade, que possibilita a densificação das peças acompanhada de retração.

Um segundo aspecto a ser avaliado no comportamento de RL das amostras (massa cerâmica) é que ela não sofreu retração muito significativa que possibilitasse deformidades nos corpos de prova.

Tabela 13. Retração linear após a queima. Fonte: Autores, 2020.

| Nº de corpo de prova | Comp. 110°C (mm) | Comp. final (mm) | Retração (%) |
|----------------------|------------------|------------------|--------------|
| 1 | 93,95 | 92,92 | 1,09 |
| 2 | 94,20 | 93,18 | 1,09 |
| 3 | 94,97 | 92,95 | 2,12 |
| 4 | 93,83 | 91,82 | 2,14 |
| 5 | 95,09 | 93,07 | 2,12 |
| 6 | 94,63 | 93,62 | 1,06 |
| Média | | | 1,60 |

Para a retração linear após a queima, Dondi (2006) afirma que a variação ótima é menor do que 1,5% e a variação aceitável está entre 1,5 e 3%. Como todos os valores encontram-se com variação inferior a 3%, pode-se afirmar que estão dentro do limite recomendável.

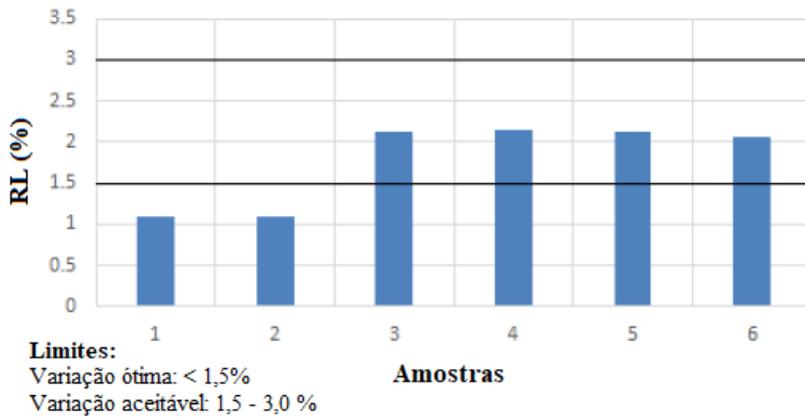


Figura 9. Retração linear após a queima.

Fonte: Autores, 2020.

3.5. Índice de absorção d'água

A Tab. 14 apresenta os valores obtidos e a Fig. 10 mostra os resultados encontrados da AA nas formulações apresentadas.

Segundo, Sanchez-Munõz (2002), a porosidade aberta (AA) dos corpos cerâmicos compostos basicamente de argilas está relacionada à redução do volume inicial devido à perda de massa pelos processos de desidratação e, principalmente, desidroxilação.

Tabela 14. Índice de absorção d'água. Fonte: Autores, 2020.

| Nº de corpo de prova | M_s (g) | M_s^* (g) | AA (%) |
|----------------------|-----------|-------------|-------------|
| 1 | 122,08 | 133,15 | 8,31 |
| 2 | 120,05 | 132,28 | 9,24 |
| 3 | 115,76 | 126,55 | 8,53 |
| 4 | 120,26 | 131,07 | 8,25 |
| 5 | 123,91 | 133,53 | 7,20 |
| 6 | 118,41 | 129,65 | 8,67 |
| Média | | | 8,37 |

* M_s = massa saturada.

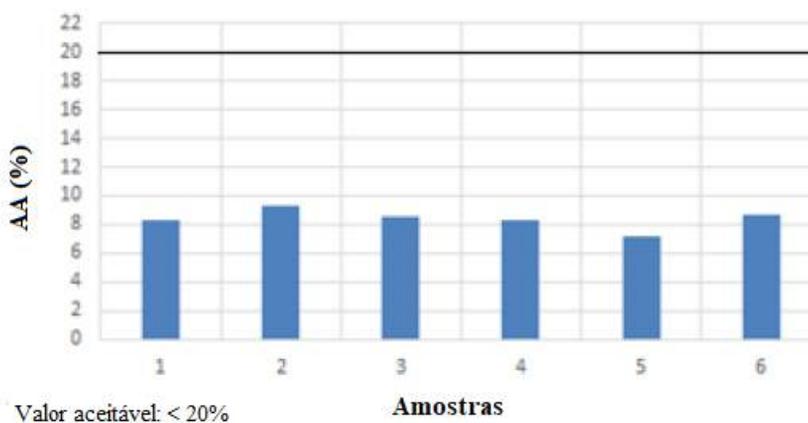


Figura 10. Índice de absorção d'água.

Fonte: Autores, 2020.

Todos os resultados encontrados da AA estão de acordo com as normas vigentes regulamentadas pela NBR 15270-1 (ABNT, 2005). A norma indica que o índice de absorção d'água deve ser inferior a 20%.

3.6. Volume aparente (V_a)

A Tab. 15 apresenta os valores obtidos e a Fig. 11 mostra os resultados encontrados do V_a nas formulações apresentadas.

Tabela 15. Volume aparente. Fonte: Autores, 2020.

| Nº de corpo de prova | M_u (g) | M_i (g) | V_a (%) |
|----------------------|-----------|-----------|--------------|
| 1 | 143,64 | 80,80 | 62,84 |
| 2 | 142,10 | 83,50 | 58,60 |
| 3 | 135,03 | 82,67 | 53,36 |
| 4 | 141,37 | 82,62 | 58,75 |
| 5 | 144,65 | 87,19 | 57,46 |
| 6 | 139,75 | 85,25 | 54,50 |
| Média | | | 57,59 |

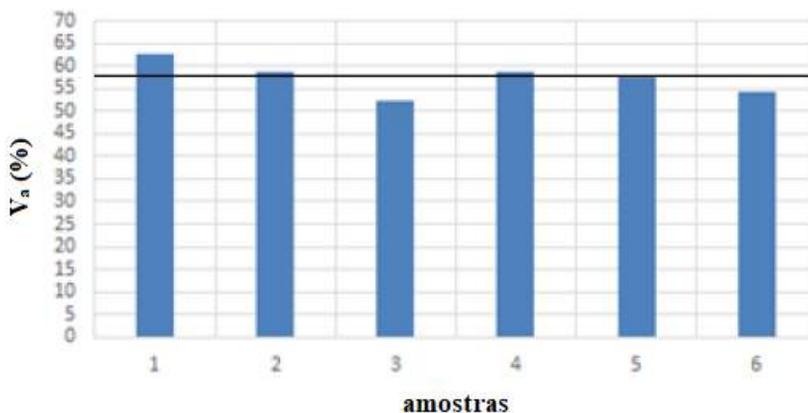


Figura 11. Volume aparente.

Fonte: Autores, 2019.

3.7. Porosidade aparente (P_a)

A Tab. 16 apresenta os valores obtidos e a Fig. 12 mostra os resultados encontrados da P_a nas formulações apresentadas.

Tabela 16. Porosidade aparente. Fonte: Autores, 2020.

| Nº de corpo de prova | $P_u - P_s$ (g) | V_a (g) | P_a (%) |
|----------------------|-----------------|-----------|-----------|
| 1 | 11,07 | 62,84 | 17,62 |
| 2 | 12,23 | 58,60 | 20,87 |
| 3 | 10,79 | 52,36 | 20,61 |
| 4 | 10,81 | 58,75 | 18,40 |
| 5 | 9,62 | 57,46 | 16,74 |
| 6 | 11,24 | 54,50 | 20,62 |

| | | | |
|-------|--|--|-------|
| Média | | | 19,14 |
|-------|--|--|-------|

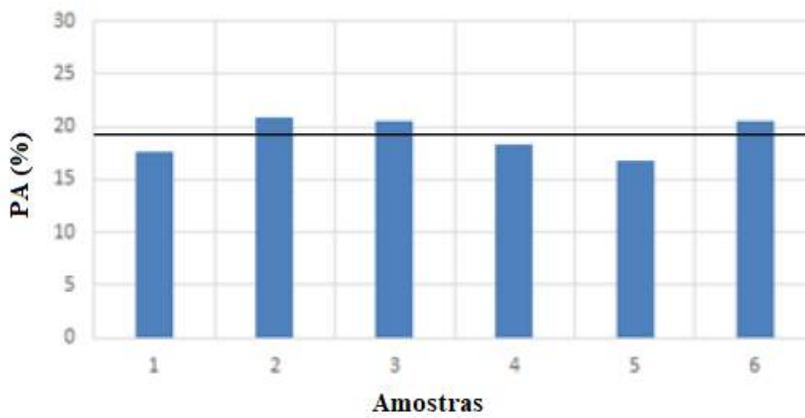


Figura 12. Porosidade aparente.

Fonte: Autores, 2020.

3.8. Massa específica aparente (MEA)

A Tab. 17 apresenta os valores obtidos e a Fig. 13 mostra os resultados encontrados da Pa nas formulações apresentadas.

Tabela 17. Massa específica aparente. Fonte: Autores, 2020.

| Nº de corpo de prova | M_s (g) | V_a (g) | MEA (g/cm ³) |
|----------------------|-----------|-----------|--------------------------|
| 1 | 122,08 | 62,84 | 1,94 |
| 2 | 120,05 | 58,60 | 2,05 |
| 3 | 115,76 | 52,36 | 2,21 |
| 4 | 120,26 | 58,75 | 2,05 |
| 5 | 123,91 | 57,46 | 2,16 |
| 6 | 118,41 | 54,50 | 2,17 |
| Média | | | 2,10 |

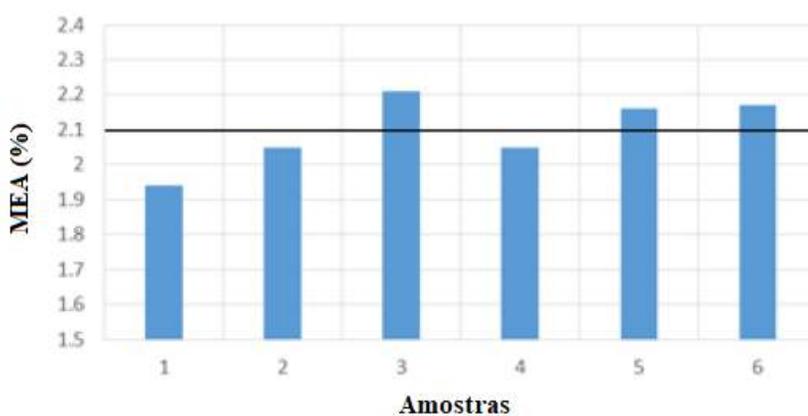


Figura 13. Massa específica aparente.

Fonte: Autores, 2020.

3.9. Tensão de resistência à flexão após queima a 950°C – (TRF)

A Tab. 18 apresenta os valores obtidos e a Fig. 14 mostra os resultados encontrados da TRF nas formulações apresentadas.

A resistência mecânica apresentada pelas amostras foi crescente à medida que se aumentou a temperatura, e atenderam a TRF mínima estabelecida pela NBR 15270-1 (ABNT, 2005). O aumento da resistência com o aumento da temperatura ocorre devido à redução da porosidade e da microestrutura formada no processo de sinterização, como a fase vítrea que proporciona maior resistência ao corpo cerâmico.

A absorção de água e a resistência mecânica mostraram uma relação direta, o que aconteceu quando relacionadas à MEA, que aumentou.

Para Santos (1989), a TRF mínima é de 65 Kg/cm², ou seja, 6,4 MPa.

Tabela 18. Tensão de resistência à flexão após a queima a 950°C. Fonte: Autores, 2020.

| Nº de corpos de prova | Esp. (cm) | Larg. (cm) | Nº de pesos | Máx. carga (kgf) – Ruptura (x10) | TRF (kg/cm ²) | TRF (MPa) |
|-----------------------|-----------|------------|-------------|----------------------------------|---------------------------|-------------|
| 5 | 1,27 | 4,52 | 5 | 156,8 | 107,54 | 10,54 |
| 6 | 1,30 | 4,53 | 5 | 146,8 | 95,87 | 9,40 |
| Média | | | | | 61,02 | 9,97 |

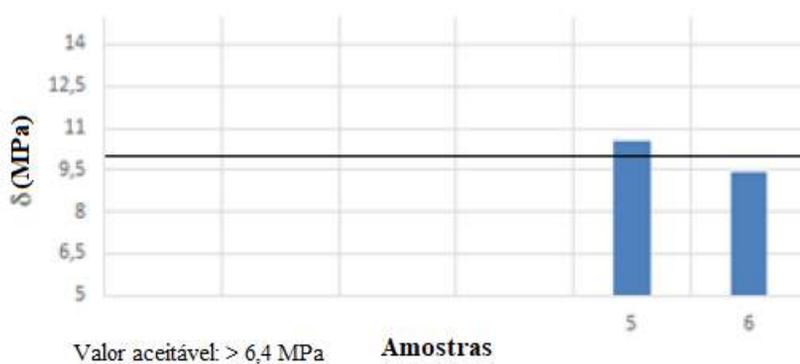


Figura 14. Tensão de resistência à flexão após a queima a 950°C.

Fonte: Autores, 2020.

3.10. Ensaio de verificação de elementos químicos na argila

Durante o ensaio de verificação de elementos químicos na argila, após a queima observou-se uma coloração amarelada nos corpos de prova, indicando a presença de óxido de ferro, que de acordo com a bibliografia, pode ser classificada como cerâmica vermelha.

3.11. Ensaio de determinação da tensão de ruptura à flexão

Após os corpos-de-prova terem sido queimados, escolheram-se dois deles (amostra 5 e 6), e utilizando equipamento de ensaio de tração da marca SHIMADZU, do laboratório de Ensaios Cerâmicos, do Instituto Federal do Piauí (IFPI), realizou-se o ensaio de tração, obtendo-se com isso, os seguintes gráficos, Figs. 15 e 16:

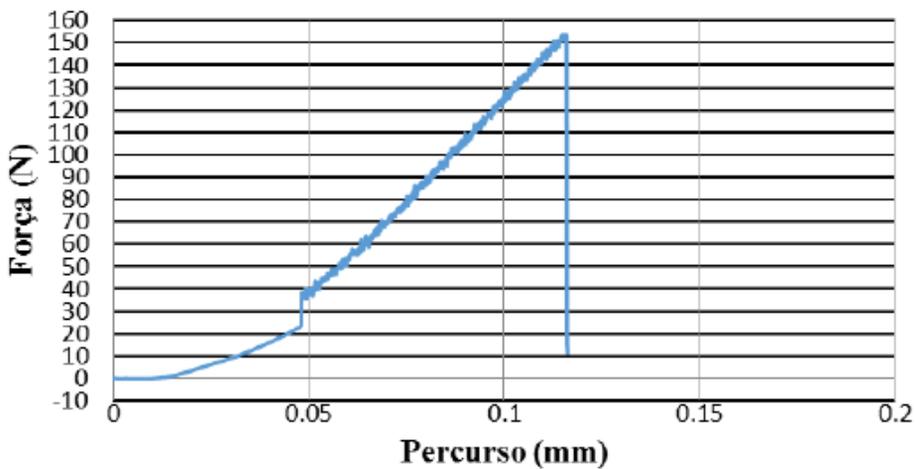


Figura 15. Ensaio de flexão realizado no corpo de prova 5.

Fonte: Autores, 2020.

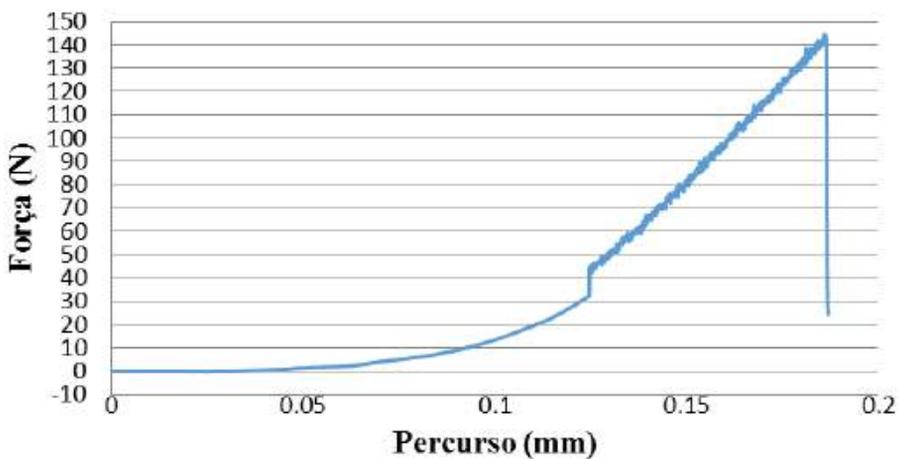


Figura 16. Ensaio de flexão realizado no corpo de prova 6.

Fonte: Autores, 2020.

De acordo com os resultados do ensaio, a força máxima de resistência do corpo de prova foi de 153,74 N para o corpo-de-prova 05 e de 143,97 N para o corpo-de-prova 06, com isso calculou-se a tensão de ruptura, cujo valor máximo encontrado foi de 2,51 N/mm² e 2,29 N/mm², respectivamente.

4. CONCLUSÕES

As argilas, por definição, são sistemas complexos constituídos por substâncias orgânicas e inorgânicas que variam de acordo com a jazida na qual foi extraída e influenciam no processo de fabricação e nas características dos produtos cerâmicos acabados. As argilas que possuem compostos hidrocópicos, como a montmorilonita, por exemplo, e menor presença de silício são mais plásticas, pois retêm mais água durante a mistura e apresentam uma maior retração durante a secagem.

Vários estudos mostram a importância da indústria cerâmica. Macêdo et. al, (2008), menciona, por exemplo, que no cenário industrial brasileiro, a indústria cerâmica tem participação de cerca de 1% no PIB nacional, sendo aproximadamente 40% desta participação representada pelo setor de cerâmica vermelha. Apesar da grande importância econômica e social da cerâmica vermelha no país, a grande maioria dos jazimentos de argilas não é devidamente estudada, não havendo, em geral, dados técnico-científicos que orientem sua aplicação industrial da maneira mais racional e otimizada possível.

Dessa forma, este trabalho visou apresentar a caracterização físico-química de amostras de argilas, buscando uma aplicação industrial para a mesma. Diversos testes foram feitos a fim de se chegar a uma conclusão. Dentre os ensaios, pode-se mencionar: percentual de umidade de extrusão, resíduo, retração linear à temperatura de 110°C e após queima, determinação da tensão de ruptura à flexão após secagem a 110°C e após queima a 950°C, perda ao fogo, absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente e as cores da argila após secagem e após a queima a 950°C.

Após a realização de todos os ensaios tecnológicos, pode-se afirmar através da análise dos resultados obtidos nas amostras estudadas, que as características físicas e mecânicas do material coletado apresentam boa aplicabilidade para a fabricação de telhas de cerâmica vermelha, para uso na construção civil. Quanto a plasticidade da argila, foi constatado que se trata de uma argila mediamente plástica, o que não traz problemas na produção de telhas, não sendo necessário melhorar a sua plasticidade através da adição ou remoção de outros constituintes. Além disso, pôde-se chegar a essa conclusão, após a verificação do limite da tensão de ruptura à flexão que foi de aproximadamente 9,97 MPa, e de acordo com o SENAI (2006), caracteriza como uma argila vermelha.

5. REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 6113/6220/MB-305: Características para blocos e tijolos maciços**. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 6459: Solo – Determinação de limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7180: Solo – Determinação de limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 15270-1: Componentes cerâmicos. Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação — Terminologia e requisitos.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 7181: Solo - Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 2016.

CAPUTO, H. P., 1988. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** 6. ed. Rio de Janeiro, Editora LTC.

DONDI, M., 2006. **Caracterização tecnológica dos materiais argilosos: métodos experimentais e interpretação dos dados.** Revista Cerâmica Industrial, 11(3).

MACEDO, R. S.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. **Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha.** Cerâmica, v. 54, p. 411-417, 2008.

NORTON, F. H., 1973. **Introdução a tecnologia cerâmica.** São Paulo, Edgar Blucher Ltda.

RÊGO, V.R., 2010. **Estudo do efeito da adição da escória de aciaria no processamento e propriedades finais de telhas cerâmicas.** Ph.D. thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil.

SANCHEZ-MUNÕZ, L.; CAVA, S. S.; PASKOCIMAS, C. A.; CERISUELO, E., LONGO, E.; CARGA, J. B., 2002. **Modelagem do processo de gresificação de massas cerâmicas de revestimento.** Revista Cerâmica, v. 48, p. 217-222.

SANTOS, L. M. N., 1989. **Apostila de Ensaios Preliminares.** Escola SENAI “Armando Arruda Pereira”. São Paulo, Brasil.

SENAI, 2005. Departamento Regional do Piauí - Centro de Tecnologia da Cerâmica “Wildson Gonçalves”. **Curso especial de tecnologia em cerâmica vermelha.** Teresina, Brasil.

SENAI, 2006. Departamento Regional do Piauí - Centro de Tecnologia da Cerâmica “Wildson Gonçalves”. **Tecnologia em cerâmica vermelha: processo de fabricação.** Teresina, Brasil.

SOBRE OS ORGANIZADORES

Wênio Fhará Alencar Borges - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, Campus Pedreiras, Pedreiras-MA.

Filipi Maciel de Melo - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, Campus Timon, Timon-MA.

Igor Antonio de Oliveira Carvalho - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, Campus Timon, Timon-MA.

ÍNDICE REMISSIVO

A

abrasivas, 8, 18
 aço, 16, 19, 78, 79, 80, 82, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93,
 94, 95, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105,
 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113
 aços, 79, 80, 91, 103, 104, 106, 112
 aerogerador, 28, 29, 31
 aerogeradores, 21, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32
 alumínio, 8, 10, 11, 14, 16, 18, 19, 116, 120, 121
 âmbar, 8, 14, 19
 ambientais, 23, 25
 anodização, 8, 10, 11, 14, 16, 18, 19
 aparelhos, 9, 48
 argila, 114, 115, 116, 119, 120, 123, 124, 128, 133, 135
 austeníticos, 103, 104
 automatização, 8

B

backup, 33, 34
 battery, 33, 34, 42, 46, 47
 bengala, 8, 14, 15, 17, 18, 19
 bicicletas, 8, 13, 14, 19
 Brasil, 5

C

carbono, 11, 19, 90, 91, 92, 98, 100, 101, 102, 105,
 108, 112
 carbonoso, 90, 92, 101
 carbonosos, 90, 91, 101, 102
 carga, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 57, 65, 66, 68, 81,
 96, 99, 103, 105, 126, 133
 catódica, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89,
 90, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 100, 101, 102
 ciências, 5, 71, 73, 75, 76, 103
 cliente, 8, 14, 19
 climatização, 48, 54, 55, 56, 57
 confiabilidade, 25, 26, 30, 32, 71, 74
 consumo, 22, 23, 48, 49, 56, 57
 contained, 48, 55, 56, 57
 contains, 33
 corrosão, 10, 11, 12, 18, 19, 78, 91, 92, 103, 104
 corte, 9, 80, 82, 90, 91, 93
 credibilidade, 71
 custos, 10, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 59, 60, 68, 91, 115

D

database, 33, 37
 defeito, 8, 14, 19
 deformação, 79, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109,
 110, 111, 112, 113
 desenvolvimento, 21, 22, 23, 25, 32, 60, 71, 74, 75, 76,
 102
 desgaste, 9, 11, 15, 18, 28, 78, 79, 82, 87, 90, 91
 desvantagens, 21, 60, 79
 diesel, 33, 34, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47

E

economic, 32, 33, 34, 39, 46, 47
 electricity, 33, 34, 35, 39, 40, 41, 42, 44, 45, 46

elétrica, 10, 11, 21, 22, 23, 25, 30, 31, 48, 49, 57, 59,
 60, 61, 68, 69, 80, 92
 eletricidade, 22, 23, 24, 25, 30, 48, 56, 57, 59, 60
 elétricos, 27, 29, 48, 56
 emission, 33, 39, 46, 47
 empreendimento, 56, 57
 energia, 9, 13, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 30, 31, 49, 50,
 51, 52, 56, 57, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68,
 69, 79, 92
 energy, 31, 32, 33, 34, 37, 39, 41, 42, 45, 46, 47
 engenharia, 16, 48, 49, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 71, 72,
 73, 74, 75, 76, 77, 101, 103, 104, 105, 108, 111,
 112, 119
 engenharias, 73
 engenheiro, 75, 76, 120
 engrenagens, 8, 19, 29
 environmentally, 33
 eólica, 21, 22, 23, 24, 27, 30, 32, 59
 equipamentos, 25, 27, 29, 30, 48, 51, 54, 55, 57, 61, 71,
 72, 74, 75, 77, 115
 erro, 14, 19, 74, 75
 excess, 33, 44, 45, 46

F

fabricação, 8, 14, 18, 19, 72, 78, 79, 82, 91, 104, 115,
 116, 123, 135, 136
 falhas, 8, 9, 14, 16, 18, 19, 21, 23, 24, 25, 27, 28, 29,
 30, 31
 fauna, 21, 22
 ferramentas, 30, 78, 79, 80, 82, 85, 86, 87, 88, 90, 91,
 92, 101, 108
 físico, 114, 135
 flora, 21, 22
 fotovoltaica, 21, 22, 23, 24, 60, 69
 fotovoltaico, 33, 59, 60, 61, 63, 67, 68

G

generator, 30, 33, 34, 41, 42, 43, 44, 45

H

hidráulicos, 29
 hidrelétrica, 22, 59
 hidrelétricas, 21, 22, 23, 24, 30, 59
 hídrica, 21
 hipóteses, 59
 hybrid, 33, 34, 42, 46, 47

I

impactos, 23, 25
 indústria, 25, 27, 30, 72, 73, 75, 78, 79, 90, 91, 115,
 135
 inoxidáveis, 103, 104, 106
 instrumentos, 9, 73, 74, 75, 76, 77
 internacional, 21, 72
 inversores, 61, 65, 67, 68, 69
 iônica, 79, 80, 81, 83, 84, 85, 87, 89, 102

K

Kashima coat, 8, 18

M

manutenção, 8, 10, 14, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 87
mecânica, 48, 49, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 91, 109, 110, 111, 112, 114, 120, 126, 133
mecânicas, 8, 10, 11, 19, 31, 79, 90, 91, 103, 104, 105, 106, 107, 112, 113, 115, 135
mecânicos, 10, 27, 28, 71, 72, 104, 105, 107, 108, 110, 113
meteorology, 33, 37, 47
metrologia, 54, 55, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77
morfologia, 80, 81, 90, 92, 96, 98, 101, 104

N

nacional, 21, 23, 72, 135
necessidades, 13, 59, 63
nitretação, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 91, 101, 102
nitretadas, 78, 82, 84, 86, 87, 88

O

otimizar, 21, 26, 28

P

plasma, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 92, 93, 94, 95, 97, 98, 100, 102
pobreza, 23, 59, 60
pollutants, 33, 46
poluentes, 22, 52
preditiva, 21, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 31
production, 33, 44, 45, 46
produtividade, 26, 78, 86

R

renda, 23, 60
renewable, 31, 33, 34, 41, 42, 43, 44, 45, 46
renovação, 26, 52, 55
renovável, 22, 30

resistência, 11, 12, 18, 78, 79, 80, 90, 91, 92, 103, 104, 107, 108, 110, 126, 133, 134
rugosímetro, 9

S

sincronizada, 71
sistema, 25, 27, 28, 29, 31, 48, 49, 52, 54, 56, 57, 59, 60, 61, 63, 65, 67, 68, 69, 72, 90, 92, 94, 95, 114
sistemas, 25, 26, 27, 29, 30, 31, 48, 49, 54, 56, 57, 69, 135
software, 16, 28, 33, 34, 37, 43, 47, 81, 97, 100
solar, 21, 22, 23, 24, 27, 28, 33, 34, 37, 38, 40, 42, 45, 46, 47, 50, 51, 59, 60, 61, 62, 63, 69
solares, 60, 61, 62, 64, 69
station tube, 8, 14, 19
superdimensionados, 48
sustentabilidade, 25
sustentável, 21, 23, 32, 60
system, 33, 34, 39, 40, 42, 43, 44, 45, 46, 47

T

técnica, 8, 11, 12, 16, 18, 21, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 74, 77, 79, 81, 87, 88, 90, 92, 94, 96, 97, 98, 100, 101, 102
técnicas, 21, 25, 26, 27, 28, 29, 56, 75, 77, 78, 90, 92, 113
técnico, 19, 77, 135
tecnologias, 8, 22
telhas, 114, 116, 119, 135, 136
térmica, 22, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 57
termoquímico, 78, 80
tração, 13, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 112, 113, 134
tribológicas, 90, 92
turbines, 31, 32, 33, 41, 42, 44, 45, 46

U

umidade, 48, 55, 56, 114, 116, 117, 119, 120, 123, 124, 127, 135
universalidade, 71

Para saber mais sobre os títulos, autoras e autores da EDITORA INOVAR,
visite o site www.editorainovar.com.br e siga as nossas redes sociais



Imortalizar ideias e transformar vidas!



A engenharia mecânica como campo de estudo é uma das poucas áreas que possuem uma vasta aplicação em diversos setores da economia. Passamos por constantes mudanças tecnológicas cotidianamente e a engenharia mecânica acompanha esses avanços. As suas áreas de atuação vão desde a concepção de materiais até a execução dos projetos, não somente na área de materiais, como também nas áreas térmica e de projetos mecânicos.

Esta obra "Engenharia mecânica e suas aplicações" tem relevante importância para os profissionais da área de engenharia mecânica devido aos diversos estudos aqui apresentados, mostrando uma ampla aplicação em suas diversas subáreas de estudo. Certamente, é um material que vem para adicionar conhecimentos para novos profissionais e os já atuantes

ISBN 978-65-86212-70-9



9 786586 212709 >