



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
**Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá**

**YGOR SANTORO NUBILE**

**Investigação de variáveis propagadoras de trincas em anéis de grande diâmetro**

Guaratinguetá

2023

**Ygor Santoro Nubile**

**Investigação de variáveis propagadoras de trincas em anéis de grande diâmetro**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Materiais

Orientador (a): Prof. Dr. Luis Rogerio de Oliveira Hein

Guaratinguetá

2023

N962i	<p>Nubile, Ygor Santoro Investigação de variáveis propagadoras de trincas em anéis de grande diâmetro / Ygor Santoro Nubile - Guaratinguetá, 2023. 38 f : il. Bibliografia: f. 36-38</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023. Orientador: Prof. Dr. Luis Rogério de Oliveira Hein</p> <p>1. Energia eólica. 2. Rolamentos. 3. Energia - Fontes alternativas. 4. Dinamos I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 620.91</p>
-------	---

Luciana Máximo  
Bibliotecária/CRB-8 3595

YGOR SANTORO NUBILE

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE  
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
"GRADUADO(A) EM ENGENHARIA DE MATERIAIS"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS



Prof.<sup>(a)</sup> Dr.<sup>(a)</sup> José Vitor Candido de Souza  
Coordenador(a)

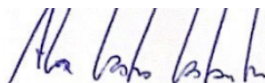
**BANCA EXAMINADORA:**



Prof. Dr. Luis Rogerio de Oliveira Hein  
Orientador(a)/UNESP-FEG



Eng. André Machado Vianna  
Membro Externo



Eng. Alex Castro Castanho  
Membro Externo

Fevereiro 2023

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, que sempre me deu forças para enfrentar todas as dificuldades encontradas e nunca me deixar desistir.

Aos meus pais, pelo amor, carinho, apoio e o incentivo desde cedo a se dedicar aos estudos, “somente o estudo pode te levar a lugares extraordinários”.

A minha noiva que sempre esteve ao meu lado em toda a graduação, que acompanhou todas as minhas dificuldades pessoais e acadêmicas, aquela que sempre me motivou quando em inúmeras vezes eu pensei em desistir e sempre me lembrou de ter fé.

Ao meu orientador, Professor Dr. Luis Rogerio de Oliveira Hein, por todo o apoio desde o segundo ano de graduação e pelo suporte em todas as etapas que foram executadas neste trabalho.

Ao Sr. André Machado Vianna, pela oportunidade de aprendizado, por confiar no meu serviço e por disponibilizar todo o espaço para a realização deste trabalho de maneira eficiente.

Ao Sr. Alex Castro Castanho por nossa amizade, por todo auxílio, companheirismo e por todas as contribuições técnicas para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Sr. Ricelmo Pena, por todo o apoio, incentivo, atenção e todo o auxílio técnico e experimental que foi muito importante para a realização deste trabalho.

E por último, aos poucos amigos da graduação que fielmente estiveram ao meu lado.

“Lembre-se que as pessoas podem tirar tudo de  
você, menos o seu conhecimento.”  
Albert Einstein

## RESUMO

A produção de energia está totalmente associada com o desenvolvimento de um país, sendo que a maioria destes utilizam combustíveis fósseis, trazendo consequências negativas em diversas esferas. Desta maneira, inicia-se a busca por novas fontes de energias, que sejam limpas e renováveis, como é o exemplo da energia eólica, uma alternativa explorada há décadas. Existe um conjunto de fatores que contribuem para a obtenção desta energia, como os geradores elétricos instalados em altas torres com rolamentos nas pás que auxiliam na captação do vento. Estes rolamentos são formados por anéis constituídos de um liga metálica, o cromo-molibdênio (42CrMo4) que são submetidos a um processo de têmpera por indução para que as pistas alcancem valores de dureza pré-estabelecidos. Como este tratamento modifica completamente a estrutura do aço, é necessário que todas as variáveis do processo sejam investigadas e controladas para que não ocorra o surgimento de trincas após a têmpera dos anéis. Dessa maneira o presente trabalho tem como objetivo determinar quais são as principais variáveis que devem ser controladas para que não ocorra a propagação de trincas nos anéis, para isso deve ser utilizada uma ferramenta da qualidade, a análise de modos de falha e seus efeitos e ainda determinar o tipo de trinca encontrada em três anéis de grande diâmetro com a técnica de réplica metalográfica. determinando suas causas. Sobre essa perspectiva pode-se concluir que as trincas são intergranulares devido a falhas metalúrgicas e as principais variáveis estão relacionadas com as condições de temperaturas.

**Palavras-Chave:** energia eólica; rolamentos; anéis; têmpera por indução; trincas;

## ABSTRACT

The production of energy is totally associated with the development of a country, and most of them use fossil fuels, bringing negative consequences in several spheres. In this way, the search for new sources of energy, clean and renewable, begins, as is the case of wind energy, an alternative that has been explored for decades. There is a set of factors that contribute to obtaining this energy, such as the electric generators installed on tall towers with bearings on the blades that help capture the wind. These bearings are formed by rings made of a metallic alloy, chromium-molybdenum (42CrMo4), which are submitted to an induction hardening process so that the raceways reach pre-established hardness values. As this treatment modifies completely the structure of the steel, it is necessary that all the variables of the process are investigated and controlled so that no cracks appear after the hardening of the rings. In this way the present work has as objective to determine which are the main variables that must be controlled so that it doesn't occur the propagation of cracks in the rings, for that must be used a quality tool, the analysis of failure modes and their effects and still determine the type of crack found in three rings of great diameter with the technique of metallographic replica. determining their causes. From this perspective it can be concluded that the cracks are intergranular due to metallurgical failures and the main variables are related to temperature conditions.

**Keywords:** wind energy; bearings; rings; heat; induction tempering; steel; cracks;

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
1.1 OBJETIVOS.....	13
<b>1.1.1 Objetivos específicos.....</b>	<b>13</b>
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>14</b>
2.1 ENERGIA EÓLICA NO CENÁRIO MUNDIAL.....	14
2.2 INDÚSTRIA EÓLICA BRASILEIRA .....	15
2.3 AEROGERADORES .....	15
<b>2.3.1 Rolamentos .....</b>	<b>17</b>
2.4.1 ANÉIS DE GRANDE DIÂMETRO .....	17
<b>2.4.1 Laminação a quente .....</b>	<b>18</b>
2.5 LIGA CROMO-MOLIBDÊNIO (DIN 42CRMO4 - SAE 4140).....	19
2.6 TÊMPERA .....	19
<b>2.6.1 Têmpera por indução .....</b>	<b>20</b>
<b>2.6.2 Alívio de tensões.....</b>	<b>24</b>
2.7 TRINCAS .....	24
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>26</b>
3.1. ANÁLISE DO MODO DE FALHA E SEUS EFEITOS (FMEA) .....	27
3.2 RÉPLICAS METALOGRÁFICAS .....	29
<b>3.2.1 Lixamento da superfície .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.2 Polimento da superfície .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2.3 Ataque químico .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2.4 Extração da réplica.....</b>	<b>32</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>33</b>
4.1 RÉPLICAS METALOGRÁFICAS .....	33
4.2 ANÁLISE DE MODOS DE FALHA E SEUS EFEITOS (FMEA).....	34
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>36</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>37</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A obtenção e a produção de energia estão diretamente ligadas com questões de desenvolvimento econômico e tecnológico de qualquer país, onde qualquer ação realizada pode trazer diversas consequências, como é o exemplo das revoluções industriais, que proporcionaram grandes mudanças. (CAVALCANTI et al., 2011)

Desta maneira a energia é uma das responsáveis por proporcionar uma condição econômica plena e ao mesmo tempo garantir o desenvolvimento tecnológico de um país, mas existem obstáculos que dificultam esse processo e estão relacionados com a maneira de obtenção. (CAVALCANTI et al., 2011)

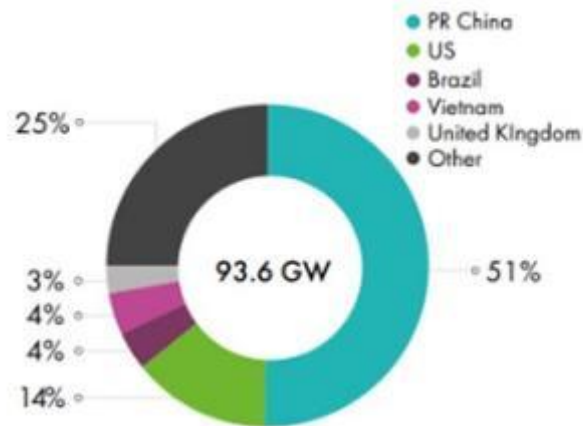
Um dos grandes obstáculos para isto é que a matriz energética está associada com os combustíveis fósseis, que são energias não renováveis e responsáveis por emitir grandes quantidades de CO<sub>2</sub> na atmosfera. (NASCIMENTO et al., 2012)

Uma solução para este problema são as energias alternativas e renováveis, como é o caso da energia solar, eólica, entre outras, que já vem sendo discutida há décadas, pois são fontes de energias inesgotáveis, menos poluentes, podem contribuir com equilíbrio na demanda energética mundial entre outros benefícios (SHINOHARA et al., 2015).

Um exemplo é a energia eólica, que vem ganhando força e pode ser interpretada como a energia de massas do ar em movimento, ou ainda, aquela obtida pela ação das forças dos ventos, significando que sua obtenção é feita a partir de um recurso renovável, limpo e muitos países já estão utilizando desta energia. (MOREIRA, 2009).

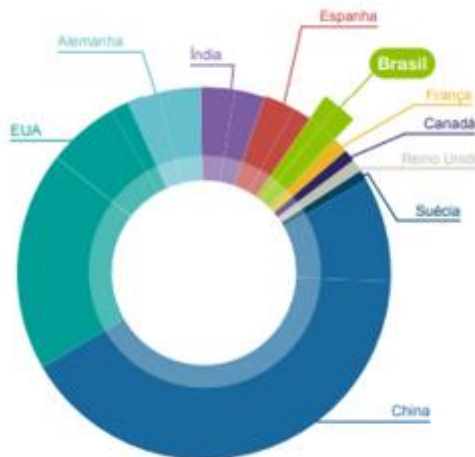
No ano de 2021, um levantamento da capacidade da utilização de energia eólica foi feito através do Global Wind Energy Council (2022) e estimou-se neste ano um valor de 93,6 GW de novas capacidades que foram adicionadas em todo o mundo, ou seja, apenas 1,8% abaixo do ano recorde, que foi em 2020, sendo um valor extremamente positivo, pois eleva a capacidade eólica total instalada para 837 GW. Ainda, este levantamento, mostra que a China vem liderando este cenário com mais de 50% dessa capacidade, já o Brasil se tornou o 6º país com mais energia eólica do mundo com capacidade instalada, atrás apenas da China, Estados Unidos, Alemanha, Índia e Espanha.

Figura 1 - Capacidade total instalada (GW) no ano de 2021



Fonte: Global Wind Energy Council (2022).

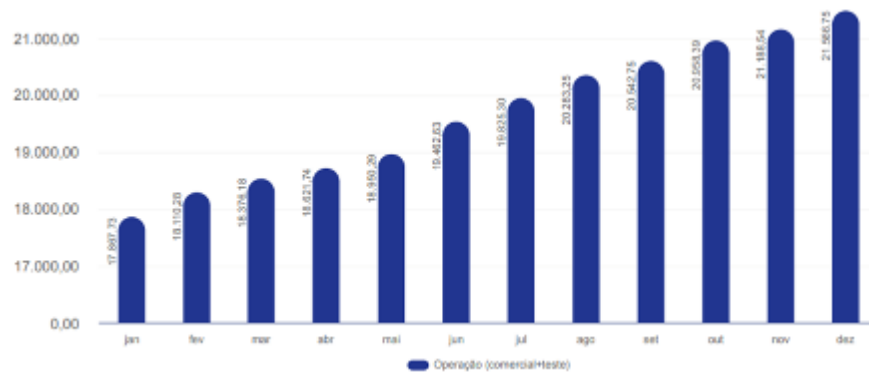
Figura 2 - Ranking dos principais países com maiores capacidade totais instaladas



Fonte: Associação Brasileira de Energia Eólica (2022)

A Associação Brasileira de Energia Eólica (2022) afirma que em dezembro de 2021 a energia eólica no Brasil finalizou com 795 usinas e com mais de 21,5 GW de potência eólica já instalada e comparado a dezembro de 2020 houve um súbito aumento de quase 21,53% de potência.

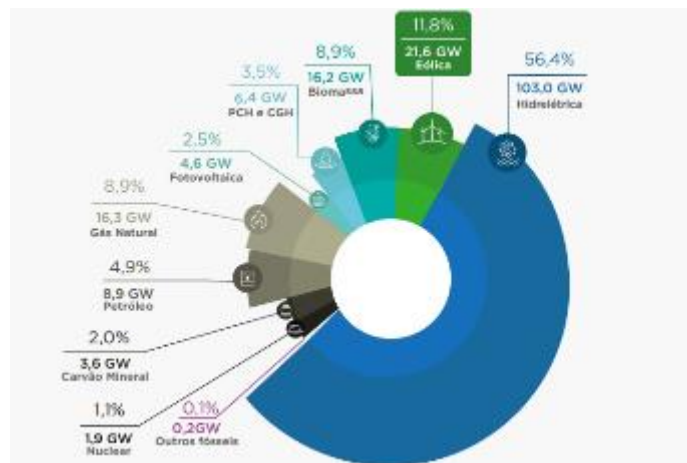
Figura 3 - Evolução da capacidade de energia eólica instalada ao longo dos meses de 2021 no Brasil



Fonte: Associação Brasileira de Energia Eólica (2022)

Esta capacidade registrada em 2021 fez com que a fonte eólica pudesse alcançar outro patamar no Brasil, pois sua participação chegou a quase 12%, como mostra a figura abaixo.

Figura 4 - Participação da energia eólica na matriz brasileira em 2021.



Fonte: Associação Brasileira de Energia Eólica (2021)

Para que este tipo de energia funcione com toda eficiência é necessário não só realizar um estudo qualitativo, mas também quantitativo sobre os ventos de onde pretende instalar essa energia. De acordo com a Agência Nacional de Energia Eólica (2008) o Brasil é diferenciado e se destaca e boa parte deste vento no Brasil se concentra na região do nordeste e isso pode ser comprovado pelo grande investimento de parques eólicos no Brasil, nesta região.

Tabela 1 - Distribuição dos parques de energia eólica no Brasil por estado e a soma de suas potências (MW) em dezembro de 2021

	Soma de Potência (MW)	Número de Parques
RN	1.690,99	42
BA	1.073,40	33
PB	471,24	15
PI	281,40	8
CE	210,00	9
PE	99,00	2
SC	4,20	1
<b>Total Geral</b>	<b>3.830,20</b>	<b>110</b>

Fonte: Associação Brasileira de Energia Eólica (2022)

Um sistema complexo está por trás da geração desta energia ganha destaque pois o mecanismo utilizado é extremamente complexo e muito bem elaborado para que a energia seja gerada com total eficiência e nenhuma anomalia aconteça no meio do processo. Desta forma, essa energia é gerada através de aerogeradores instalados em torres a mais de 100 metros de altura, onde através de grandes pás acopladas em uma turbina recebem os ventos, acionando um gerador elétrico. (CARLIN, 2001)

A energia é gerada porque existem variáveis atuando para que isso aconteça, pois a energia obtida é resultado da combinação da densidade do ar atmosférico e da área que é adquirida através da rotação das pás e ainda de toda a sua cinética e com estes conceitos observa que a efetividade da turbina está totalmente ligada com o sentido em que o vento está, assim estas torres possuem diversos rolamentos localizados nas pás e outro em sua nacele, sem estes não é possível que a geração da energia aconteça, informação extremamente importante para o entendimento deste processo. (JACOBSON, 2012).

Estes rolamentos têm uma função importante pois eles possibilitam que as pás das torres sempre fiquem em uma direção perpendicular em relação ao sentido dos ventos, isso precisa ser feito através de cálculos precisos para que a eficiência aumente. A matéria-prima destes devem possuir uma série de propriedades mecânicas especiais para suportar o tipo de aplicação, estes rolamentos são formados por dois ou mais anéis. Nessa aplicação o aço mais utilizado é a liga de cromo-molibdênio (DIN 42CrMo4), no qual é submetido a um tratamento superficial de têmpera por indução seguido de um alívio de tensão, obtendo a martensita revenida, com excelente dureza superficial (BHADESHIA, 2012).

Todo este processo precisa ser realizado com diversas variáveis controladas, pois o principal problema nesta etapa do processo é o surgimento e a propagação de trincas, fazendo com que o anel não possa ser mais utilizado, pois uma única trinca no anel pode comprometer

todo o funcionamento do rolamento.

Desta maneira, este trabalho tem como objetivo acompanhar todo o processo de têmpera por indução em um processo produtivo de rolamentos, onde através de uma ferramenta da qualidade as variáveis serão investigadas e descritas quais são possíveis propagadoras de trincas. Ainda determinar o tipo de trincas encontradas em três anéis através de réplicas metalográficas. Este trabalho foi dividido em 6 partes, sendo que após a introdução, o objetivo foi claramente definido, a revisão da literatura abordou sobre os componentes eólicos, a indústria de rolamentos, os processos de tratamento térmicos e o entendimento do aço. Após isto, foi apresentado a metodologia usada, os resultados encontrados, a discussão abordada e por último a conclusão deste trabalho.

## 1.1 OBJETIVOS

Acompanha o processo de têmpera por indução, investigando todas as variáveis presentes nesta etapa, determinando quais destas são propagadoras de trincas em anéis de grande diâmetro e ainda identificar o tipo de trincas encontradas em três destes anéis e determinar sua causa raiz.

### 1.1.1 Objetivos específicos

- II. Realizar um acompanhamento do processo de têmpera por indução através da ferramenta Análise de Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA), levantando todas as variáveis importantes.
- III. Realizar uma investigação nestes três anéis trincados, através das réplicas metalográficas em regiões com maiores concentrações de trincas e a análise em microscópio.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

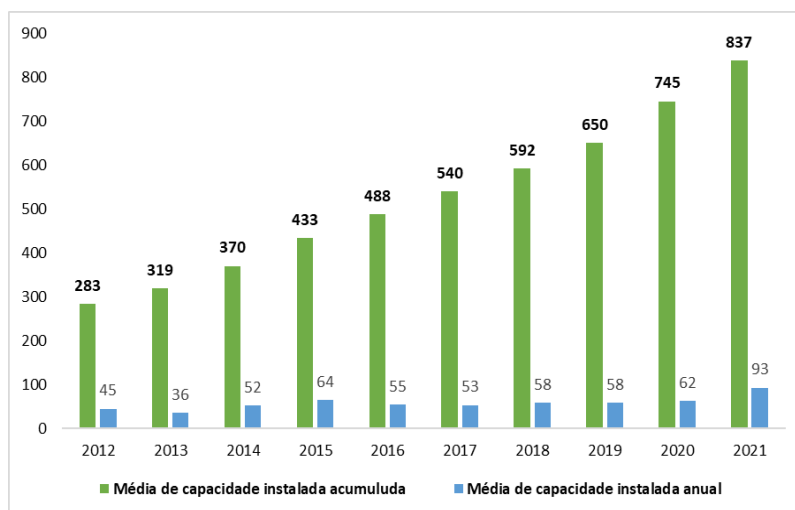
### 2.1 ENERGIA EÓLICA NO CENÁRIO MUNDIAL

Uma grande alternativa para substituir as energias não renováveis é a energia dos ventos, pois é inesgotável, predominantemente limpa, e que pode atender áreas muito amplas. Esta energia é obtida através da transferência de energia cinética das massas dos ventos em energia cinética rotacional de grandes pás, acionando turbinas, também conhecidas como aerogeradores.

O conjunto destes individualmente são acoplados a uma rede de transmissão, para enviar a energia elétrica. (GOLDEMBERG e LUCON, 2007)

O Global Wind Energy Council (2022), afirma que a indústria não parou de buscar espaço no mercado, nem mesmo com a crise financeira da última década que abalou diversos setores industriais. Em 2010 houve uma baixa, chegando somente a 40 GW/ano e mesmo assim não se rendeu. Cinco anos depois, a indústria eólica voltou a crescer novamente, isso aconteceu devido a investimentos por parte de empresários neste ramo, possibilitando a expansão em diversos países, como por exemplo novas instalações na China que resultaram em altos ganhos. No ano de 2020, a situação mudou completamente, onde a capacidade deste tipo de energia aumentou, ganhando ainda mais credibilidade no setor energético e disputasse com outras energias renováveis comumente usadas

Figura 5 - Evolução da capacidade instalada acumulada e da capacidade instalada anual entre 2012 a 2021



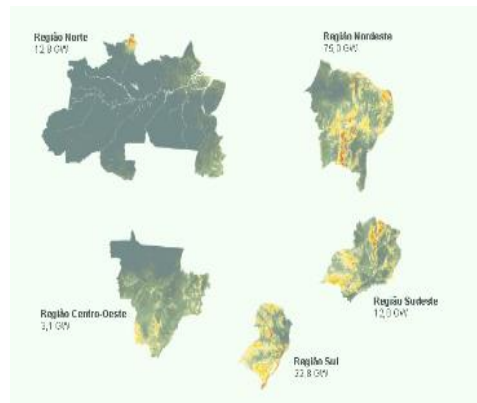
Fonte: Adaptado de Global Wind Energy Council (2022)

## 2.2 INDÚSTRIA EÓLICA BRASILEIRA

Segundo Amarante et al. (2001) grande parte do estado brasileiro é abastecido com energia elétrica proveniente de usinas hidráulicas, no qual constitui uma matriz energética predominantemente limpa. Porém, diante do cenário de grande mudança em diversas esferas da sociedade e diversas preocupações com o meio ambiente, o Brasil também entrou na procura por outras fontes de energia limpas, como por exemplo eólica.

Ainda segundo Amarante et al. (2001) este tipo de energia precisa do vento para que a transformação aconteça e que desde o começo dos anos 2000 foi iniciado um estudo sobre o potencial de ventos no Brasil, na qual foi elaborado um Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (2001) pelo CEPEL. Este documento mostra que potencial eólico brasileiro é estimado em 143,5 GW e o maior potencial concentra-se na região nordeste com 75 GW.

Figura 6 - Atlas do potencial eólico brasileiro dividido por região

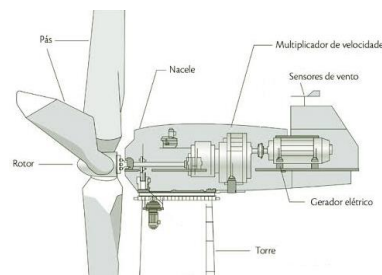


Fonte: Amarante et al. (2001)

### 2.3 AEROGERADORES

Segundo Rodrigues (2016) um aerogerador possui diversos componentes que variam de acordo com cada empresa, mas tudo se inicia no rotor, cuja sua finalidade é conseguir captar a os ventos, onde ocorre uma força denominada aerodinâmica através dos grandes fluxos de ar que consegue colocar no rotor. As pás deste sistema são unidas através de um cubo, que através de rolamentos, localizadas nas pás e nas naceles, fazem o sistema funcionar.

Figura 7 - Componentes gerais de um aerogerador;



Fonte: Website da empresa Windbox (2022)

Figura 8 - Representação genérica dos rolamentos das pás e do rolamento que faz a conexão da torre com a nacele



Fonte: Website da empresa Thyssenkrupp (2022)

### 2.3.1 Rolamentos

Os rolamentos são montados sobre o cubo de cada pá e é este que permite que a pá possa girar e consiga ajustar a posição angular de maneira que otimize a potência e performance aerodinâmica de controle de carga, assim controle do passo é a parte do principal no sistema de funcionamento da turbina. (JACOBSON, 2012).

Para a fabricação destes é preciso levar consideração toda a cadeia de suprimentos eólicos do Brasil, sendo muito destes estratégicos e poucos itens considerados críticos, como é o caso de esferas, gaiolas, caixas multiplicadoras, os próprios rolamentos e etc. (MANWELL et al., 2006).

Desta maneira, as empresas que investem em energia eólica no Brasil, tem a necessidade muito grande de gerenciar suas compras com os fornecedores uma vez que o mercado fornecedor é de elevada complexidade e há riscos de fornecimento. São exemplo de investidores no mercado eólico Brasileiro: A Gamesa que tem participação acionária no fabricante de torres Torrebras, a Nordex/Acciona que opera com fábricas de torres de concreto próprias, montadas próximas aos parques eólicos com projeto e processo próprios patenteados, tem-se a empresa WEG que investe no mercado eólico com diversas torres eólicas e por último a Vestas, a maior fabricante de aerogeradores do mundo, que investe pesado no parques eólicos no Brasil, principalmente na região do nordeste, onde concentra muito de seus aerogeradores (MANWELL, et al 2006).

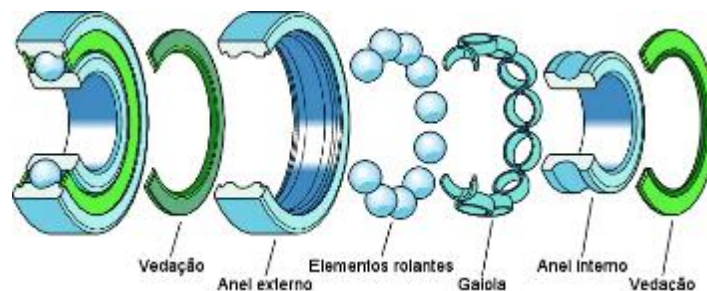
Com base no último relatório do Global Wind Energy Council (2022) uma grande quantidade de torres novas foram instaladas no território brasileiro, o que implica na produção de muitos itens para formar o sistema.

## 2.4 ANÉIS DE GRANDE DIÂMETRO

Os rolamentos são elementos projetados para suportar diversos tipos de ações enquanto estiver em funcionamento, portanto são produzidos levando em consideração diversos fatores. A estrutura dos rolamentos é formada a princípio por dois anéis, somando com elementos rolantes, todos estes são fabricados em material que contém aço carbono ao cromo.

Ainda pode possuir elementos adicionais, como partes específicas com revestimentos poliméricos para a apoio das vedações que deslizam enquanto o rolamento estiver em funcionamento (BRESCIANI et al., 2011). De modo genérico, a figura a seguir mostra esses componentes

Figura 9 - Representação genérica de um rolamento



Fonte: Adaptado do Website da SKF rolamentos (2023)

### 2.4.1 Laminação a quente

Estes anéis são produzidos em grande escala visto a grande necessidade da produção dos rolamentos, sendo a grande maioria destes com diâmetros que variam entre 801 mm a 7.000 mm e são processados por laminação a quente. Anéis que possuem diâmetro entre 801 mm a 7.000 mm devem passar pelo processo de laminação a quente, sendo este um procedimento um dos mais diferenciados e avançados quando se trata de conformação mecânica dos aços, nestes anéis sem costura. (BRESCIANI et al., 2011).

A primeira fase é denominada como preparação da forma, cujo objetivo é a obtenção de uma barra cilíndrica. Nesta etapa é realizado um corte com especificações pré-definidas e exposto a altas temperaturas. A segunda etapa é quando é feito um ajuste na barra com o objetivo de aumentar a distorção e ainda certificar que os vazios foram cobertos. Por último, é necessário que seja feito um recalque na barra através de puncionamento para que seja removido o núcleo deste material (MANWELL, 2006)

A segunda parte do processo é justamente denominada a laminação a quente, na qual a pré forma já passou pelo pré aquecimento e é posicionada entre rolos radiais utilizados para que a espessura do anel seja reduzida nesta direção e os rolos axiais são os responsáveis por realizar o controle da altura destes anéis. O rolo radial junto com um mandril de posicionamento se move um contra ao outro, diminuindo a distância entre eles e desta maneira pode acontecer uma redução na espessura da parede do anel. Assim o diâmetro deste anel cresce, ou seja, um fenômeno de incompressibilidade é colocado sobre o material. (MANWELL, 2006)

## 2.5 LIGA CROMO-MOLIBDÊNIO (DIN 42CRMO4 - SAE 4140)

Segundo Bhadeshia (2012) a matéria prima para fabricação destes anéis é o aço DIN 42CrMo4, este material tem como base uma liga de cromo-molibdênio e quando comparado com outros aços comumente utilizados em diversas aplicações, ele é o que se destaca por possuir uma característica de endurecimento relativamente elevado. Isso se deve devido ao fato do índice destes dois elementos, que vão conferir ao material uma resistência elevada e vão de fato melhorar as propriedades.

Segundo Rocha (2004) esta liga possui e sua porcentagem de carbono em 0,4%, portanto ele é um aço de médio carbono muito indicado para forjamentos e laminação a quente, pois possui uma excelente ductilidade, resistência ao choque, resistente ao desgaste e consegue ser fluente até altas temperaturas.

Outra característica importante que este aço tem após se adquirir uma microestrutura de martensita é a sua dureza superficial, que pode ser consideravelmente aumentada através de tratamentos térmicos superficiais de indução e que para a aplicação do produto final é extremamente importante visto que as pistas destes anéis precisam ter excelente dureza para resistir aos esforços feitos pelas esferas dentro dos rolamentos (ROCHA, 2004)

Tabela 2 - Composição da liga Cromo-Molibdênio

Aço	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%P
DIN 42CrMo4	0,38-0,43	Max 0,04	0,75-1,00	0,8-1,10	0,15-0,35	Max 0,035

Fonte: Catálogo Villares Metal (2003)

## 2.6 TÊMPERA

Segundo Silva (2010) a definição mais objetiva para o processo de têmpera é quando o material é aquecido até uma temperatura 870°C (austenitização) e é resfriado de maneira rápida, resfriamento este realizado com um meio adequado. Este resfriamento tem que ser rápido

obtendo então a martensita. A martensita é gerada por ocorrer um cisalhamento atômico, onde átomos estão se movimentando no mesmo instante, ocasionado uma transformação em níveis atômicos. Sendo que o resfriamento causa uma organização da estrutura, influenciando na microestrutura, com um ótimo endurecimento e um aumento de certas propriedades.

### 2.6.1 Têmpera por indução

A têmpera por indução segue com o mesmo objetivo da têmpera tradicional, obter a martensita através do aquecimento e resfriamento rápido, alcançando valores de dureza pré-definidos. Porém, este aquecimento é ocasionado através de fluxo de corrente alternada, com uma bobina de cobre (também chamada de indutor) com um concentrador de fluxo em sua extremidade, que direciona toda esta energia para a superfície da peça, realizando assim o tratamento por indução (Website Elotherm SMS, 2023).

A superfície do aço consegue alcançar uma temperatura de pelo menos  $723^{\circ}\text{C}$ , o que é considerado como uma temperatura eutetóide, mas pode chegar até  $870^{\circ}\text{C}$ , (austenitização) e isso somente ocorre porque o campo magnético provoca o aquecimento. (FERREIRA, 2004)

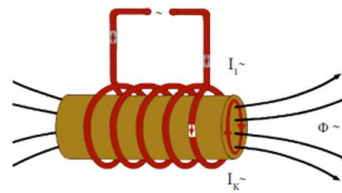
Figura 10 - Indutor para realizar a têmpera por indução de anéis.



Fonte: Website Elotherm SMS (2023)

Este mecanismo de corrente alternada vai fazer com que gere um campo magnético correspondente, que induz corrente parasitas, ou ainda, correntes de Foucault, no interior da peça de trabalho e conseqüentemente produz calor no interior da peça. (FERREIRA, 2004)

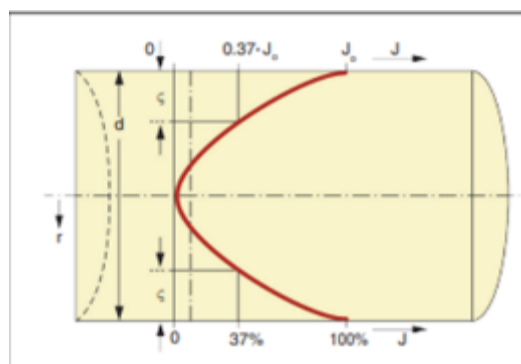
Figura 11 - Representação onde o campo magnético alternado induz correntes de Foucault aquecendo abaixo da superfície da peça



Fonte: Website Elotherm SMS (2023)

Segundo Ferreira (2004) a profundidade em que a peça é aquecida, é inversamente proporcional à frequência de corrente da bobina, desta forma, quando se tem frequências mais altas produzem um aquecimento mais superficial na peça, fenômeno este conhecido como efeito peculiar. O calor que é produzido no interior da peça não necessariamente precisa ser transferido para a superfície por radiação ou convecção.

Figura 12 - O efeito Pelicular, onde frequências mais alta concentram calor próximo à superfície e longe do centro da peça



Fonte: Website Elotherm SMS (2023)

O aquecimento precisa ser rápido para evitar que o núcleo de sua peça não seja indevidamente aquecido, sendo que antes desse aquecimento, a superfície da peça contém uma mistura de ferrita e também da cementita, se estiverem a uma temperatura de 25°C (Macedo, 2007)

Segundo Macedo (2007) o aço é austenitizado e o carbono da cementita vai se dissolver na austenita, visto que o carbono tem uma solubilidade maior na austenita quando comparado à sua solubilidade na ferrita, sendo este carbono dissolvido totalmente importante pois a peça

de aço deve conter pelo menos 0,02% de carbono para ser endurecida. A austenitização pode ser vista no processo quando o concentrador de fluxo chega muito próximo da superfície da peça e a mesma apresenta uma coloração laranja-avermelhada, indicando que está nesta temperatura e o processo de transformação foi iniciado.

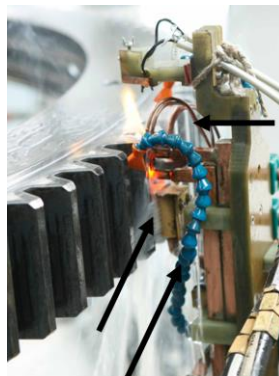
Figura 13 - Austenitização observado no indutor no momento do processo de têmpera por indução



Fonte: Adaptado do Website Elotherm SMS (2023)

O próximo passo é o resfriamento rápido deste aço que precisa ser realizado imediatamente. Para isso, junto ao indutor deve existir uma ducha que faz o papel de arrefecimento, que conforme a peça vai sendo induzida, ela vai sendo resfriada. Além disso, para que não ocorra o superaquecimento do indutor, tubulações com saída de água devem estar direcionadas para ele.

Figura 14- Sistema de resfriamento acoplado ao indutor



Fonte: Adaptado do Website Elotherm SMS (2023)

A rapidez deste resfriamento impede a difusão dos átomos de carbono e a transformação na mistura original de suas fases. Estes átomos de carbono na austenita ficam “presos” na ferrita, onde a ferrita originalmente com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), se deforme, formando uma estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC), que é que precisa ser obtido, a martensita. (KANG, 2012).

O controle do resfriamento combinado com propriedades elétricas, como compensação, potência, tensão e frequência, possibilitam um resultado específico que não é possível obter com precisão em têmperas tradicionais, que é a profundidade de têmpera, medida em milímetros. (KANG, 2012).

A profundidade de têmpera pode ser medida através de um transdutor que consegue mensurar na peça qual profundidade a martensita foi atingida, sendo que quanto maior a tensão e maior a frequência, maiores serão as profundidades alcançadas. (RUDNEV et al., 2017)

Desta maneira o nível de formação da martensita, ou a profundidade de têmpera, estão totalmente relacionado com a velocidade de arrefecimento, a qual pode ser controlada através da seleção do correto meio de resfriamento, sendo que para anéis de grande diâmetro não é recomendado usar somente água pura para fazer este processo, visto que o resfriamento brusco, significa aumento de velocidade e o diminuição da profundidade, pois a velocidade rápida impede que átomos do material se arranjam de maneira cristalina e a camada temperada será superficial e isso pode ocasionar trincas nos raios dos anéis eólicos, fazendo com que eles fiquem inutilizáveis. (RUDNEV et al., 2017)

O método de têmpera por indução tem sido um processo padrão para a peças de grandes diâmetros, como é o caso dos anéis eólicos de pistas simples duplas. Para que a indução seja realizada com sucesso, o conjunto do indutor fica fixo em uma das partes, enquanto que o anel gira com uma velocidade tangencial baixa e constante passando pelo indutor.

Uma pequena zona macia (área não endurecida) permanece necessariamente ao final do percurso. Uma pista de rolamento de quase 4 metros de diâmetro, pode ser endurecida em menos de 2 horas.

Figura 15 - Máquina de Têmpera de indução eletromagnética para anéis de até 6 metros de diâmetros



Fonte: Website Elotherm SMS (2023)

### 2.6.2 Alívio de tensões

Segundo Chiaverini, (1998) o alívio do aço é o ato de realizar o aquecimento de todo o corpo metálico em uma temperatura bem abaixo da austenitização e mantê-lo nesta mesma temperatura por um longo período, este conhecido também como temperatura de encharque e em seguida este é resfriado pelo ar livre.

O principal objetivo é reduzir as tensões residuais geradas pelo processo anterior e, ao auxiliar na obtenção de valores excelentes para resistência a tenacidade e microscopicamente falando, os grãos da matriz vão aumentar de tamanho (ASM HANDBOOK, 1991).

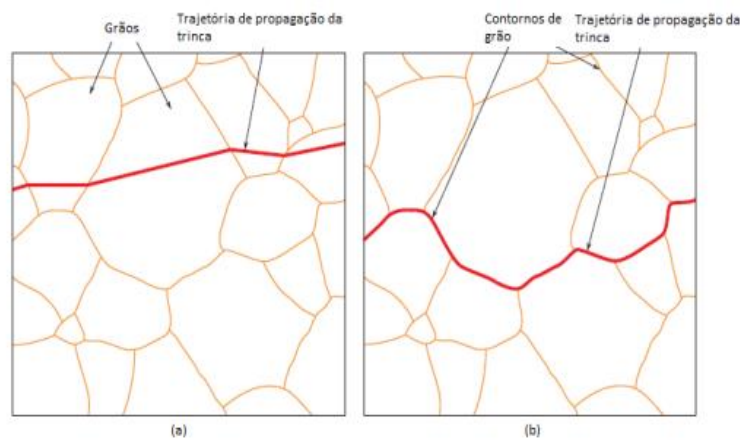
## 2.7 TRINCAS

De maneira geral as trincas são um dos tipos mais graves de descontinuidade nos materiais metálicos que podem trazer sérias consequências para o produto final. As trincas podem ser classificadas como intergranulares, ou seja, contornam o contorno de grão e geralmente são originadas por falhas nos processos metalúrgicos devido à fragilização ou trinca transgranulares, que rompem o contorno de grão e geralmente estão associadas com problemas de tensão residual do material (LOPES JUNIOR, 2011)

Quando se trata tratando de anéis na etapa de têmpera por indução, muitos fatores podem estar envolvidos para o surgimento destas trincas. Irregularidades ou descontinuidades na geometria nas pistas dos anéis ou nos concentradores de fluxo no indutor, podem distorcer o

campo eletromagnético que é gerado, ocasionando certas trincas se iniciam nas regiões que serão endurecidas. Esta distorção ainda pode resultar em trincas nos anéis devido a grandes gradientes térmicos e o superaquecimento é uma das causas destas falhas, visto que quando se tem uma temperatura extrema isso vai resultar em uma fusão incipiente do contorno dos grãos, que está relacionada com impurezas do próprio aço, na qual ficam nos contornos de grãos. (DOYON et al., 2016)

Figura 16 - Exemplo de trincas transgranulares (a) e intergranulares (b)



Fonte: Lopes Junior (2011)

Outro ponto importante sobre a formação e propagação das trincas são as tensões que existem no material e que combinadas com variáveis não controladas geram as trincas. As tensões podem ser classificadas de muitas maneiras, sendo que estas podem ser classificadas em macroscópicas ou microscópicas, as primeiras surgem a uma distância que excede muitos grãos, já a as tensões microscópicas vão ocorrer apenas dentro de um único grão e incluem tensões que pode surgir em uma escala atômica, mas quando se trata de têmpera por indução tensões mais comuns são as macroscópicas. (DOYON et al., 2016)

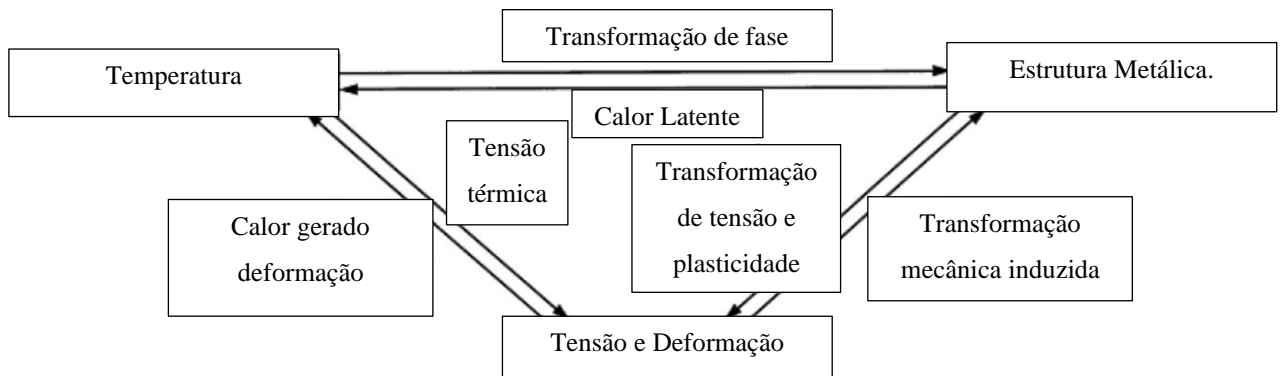
Segundo Rudnev et al (2017) inúmeras tensões podem ser encontradas quando se trata de um aço sendo submetido à têmpera por indução, como é o caso das tensões térmicas, tensões de transformação de fase e tensões aplicadas diretamente no aço. As tensões térmicas são geradas devido a diferenças grandes de temperatura e gradientes térmicos, bem como expansão e contração desiguais do metal, um exemplo clássico são materiais que não foram realizados pré-aquecimento antes de seu tratamento térmico. As tensões que são diretamente aplicadas fazem correlação com processos anteriores ao de tratamento térmico, como é o caso

da usinagem de desbaste, que antecede a têmpera por indução, com a remoção de materiais e os parâmetros de usinagem, que somam ao material mais tensões. (RUDNEV et al., 2017).

As tensões de transformação de fase são geradas devido a mudanças volumétricas que ocorrem com as estruturas cristalinas e que podem acompanhar durante a formação de inúmeras fases do aço, assim durante a transformação de austenita para martensita, um aumento de volume da rede cristalina pode ser considerado alto, pois varia entre 2 e 4% de crescimento fazendo com que haja um aumento das tensões residuais, pois muita compressão está envolvida durante o processo e caso o resfriamento não seja realizado da maneira certa, mais tensões serão aplicadas no material. (RUDNEV et al., 2017)

Ainda segundo Rudnev et al (2017) com o aumento excessivo de tensões pode-se atingir facilmente o limite de escoamento do aço e então a ruptura do material, o que gera distorções e as próprias trincas. A figura abaixo mostra a relação entre diversos fatores que resultam em tensões residuais e que podem gerar a iniciação e propagação de trincas, caso não seja controlada.

Figura 17- As interações entre vários fatores de importância para a geração de tensões residuais.



Fonte: Adaptado de ASM Handbook (1991).

### 3. METODOLOGIA

Para que seja investigado com profundidade todas as variáveis do processo de têmpera por indução eletromagnética e classificá-las como importantes ou não para a propagação de trincas, foi usada a seguinte ferramenta da qualidade: análise dos modos de falha e seus efeitos

(FMEA). Para análise dos anéis trincados foram utilizados a réplica metalográfica com análise em microscópio.

### 3.1. ANÁLISE DO MODO DE FALHA E SEUS EFEITOS (FMEA)

Segundo Teixeira (2019) uma das ferramentas da qualidade que pode contribuir com a análise de variáveis é a análise dos modos de falha e seus efeitos que traduzido para o inglês ganha a seguinte sigla: FMEA. Este foi criado em meados dos anos 40 e desde então é muito utilizado em muitas áreas industriais, visando prever e reduzir possíveis falhas em um processo, assim através desta ferramenta o processo fica estável e pode reduzir o número de índice de refugo por perda do produto.

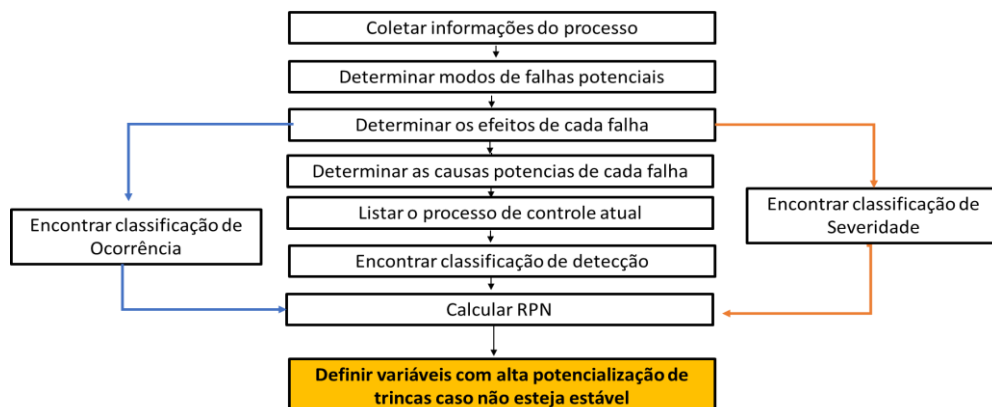
O FMEA é um conceito que visa entender possíveis imperfeições, problemas ou ainda definir variáveis que são de extrema importância para o processo, pois estas quando não controladas de maneira eficiente podem gerar desperdícios, defeitos ou ainda resultados que prejudicam a empresa e pode afetar a entrega das peças. (MENEZES, 2020).

Ainda, segundo Menezes (2020) afirma que esta ferramenta da qualidade é totalmente necessária para entender qualquer etapa do processo seletivo, pois ele possui a capacidade de identificar a causa e o devido efeito relacionado com algum tipo de falha do processo.

Essa ferramenta da qualidade faz uma análise sistemática de um processo, que busca verificar possíveis falhas por variáveis não controladas, assim pode-se implementar medidas corretivas e preventivas.

Desta maneira, utilizou-se para mapear as variáveis do processo de têmpera por indução, o FMEA. Foi realizado uma adaptação do que Menezes (2020) propõe um fluxograma a ser seguido em seu estudo, que pode ser observado na figura abaixo

Figura 19 - Fluxograma das etapas do FMEA



Fonte: Adaptado de Menezes (2020)

Segundo Menezes (2020) para determinar quais variáveis possuem alta chance de serem potencializadoras de trincas, é preciso determinar os valores de gravidade (G), detecção (D) e a frequência (F) e estas formam o RPN (*Risk Priority Number*), com a seguinte equação:

$$RPN = G \times D \times F \quad (1)$$

Caso o número encontrado esteja entre 1 a 99 o risco é baixo, se estiver de 100 a 500 o risco é moderado, mas se estiver na faixa de 501 a 1000 o risco é altíssimo. Dessa forma entende-se que quanto maior o número encontrado no RPN maior será o grau de risco que esta variável oferece ao processo e maior serão as ações a serem tomadas. Usou-se a tabela abaixo para poder fazer o FMEA do processo de têmpera por indução e os resultados obtidos foram registrados.

Figura 20 - Modelo utilizado para determinar modos de falha e as variáveis no FMEA

FMEA - Análise dos modos de falhas e seus efeitos							
( ) MANUTENÇÃO ( ) PROCESSO ( ) SISTEMAS							
ETAPA DO PROCESSO	POTENCIA X	FALHAS POSSÍVEIS			CONTROLES ATUAIS	ÍNDICES	
		MODO DE FALHA	EFEITO DA FALHA	CAUSAS		S	O

Fonte: Adaptado de Menezes (2020)

### 3.2 RÉPLICA METALOGRÁFICA

Os ensaios considerados destrutivos são metodologias empregadas em um material para que se possa verificar as suas propriedades ou outras solicitações requeridas, mas essa técnica resulta na inutilização do material pois a este será danificado, mesmo que os danos sejam pequenos não é possível que a mesma volte a ser usada nas operações. As técnicas destrutivas se tornam difíceis de serem realizadas em algumas situações por fatores de geometria da peça ou simplesmente por questões de logística. Nessa situação técnicas não destrutivas são aplicadas. (AFFONSO, 2002)

Ainda segundo Affonso (2002) a utilização de técnicas não destrutivas visa a detecção de falhas no material, como é o caso da identificação de trincas que utilizam ensaios penetrantes e

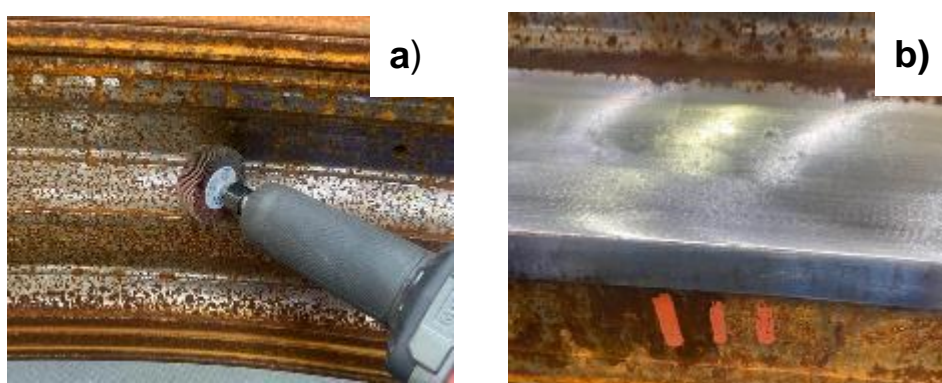
partículas magnéticas, mas é muito comum a utilização desta metodologia para interpretar diversos tipos de fraturas através de ensaios metalográficos, como por exemplo, as réplicas metalográficas. As réplicas metalográficas segundo a ISO 3057 permite a análise de qualquer microestrutura de um material ou equipamento sem que precise de fato danificá-lo, então primeiro deve-se escolher a região contendo as falhas e preparar a superfície com o lixamento e polimento, depois é feito um ataque químico com um reagente específico. Dessa forma, a microestrutura pode ser revelada e uma folha de acetato impregnada com solvente é colocada na superfície, assim a falha é replicada. A réplica então pode ser examinada em uma microscopia e os resultados podem ser interpretados. Desta maneira, para este trabalho foi utilizada esta técnica não destrutiva, para identificar o tipo de trincas presente nos três anéis, os passos para a réplica seguiram a ISO 3057.

### 3.2.1 Lixamento da superfície

Com o auxílio de uma retífica elétrica com e uma roda de lixa com grão 40 foi necessário realizar a remoção de toda oxidação das pistas dos três corpos de prova, pois estes estavam segregados e expostos às intempéries climáticas, sofrendo corrosão.

Após a remoção da oxidação das pistas dos corpos de prova, realizou-se marcações identificando a quantidade de trincas a serem replicadas em cada uma das peças, sendo que para o primeiro foram separadas cinco regiões, para o segundo e terceiro, duas regiões cada.

Figura 21 - Remoção da oxidação da pista (a) e marcação das regiões com trincas (b)

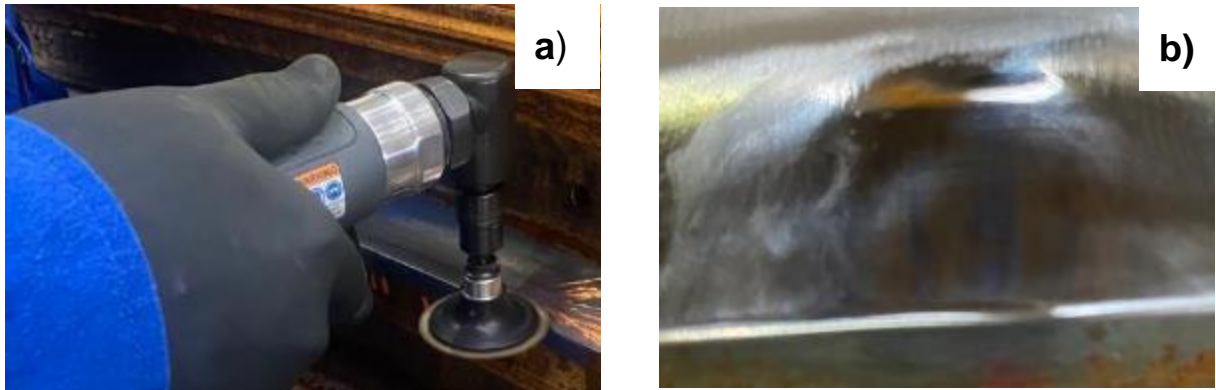


Fonte: Acervo do autor

Iniciou-se o procedimento de lixamento sobre as regiões demarcadas com as trincas a serem replicadas. Nesta etapa foi utilizado uma retificadora pneumática, com uma sequência de lixas pré-definidas, a começar da mais grossa para a mais fina, sendo a P200, P400, P600,

P1200, respectivamente, para que todos os riscos fossem completamente removidos. Esse procedimento foi realizado com muita precisão, para que todas as regiões ficassem livres de riscos.

Figura 22 - Lixamento das regiões (a) e resultado após lixamento (b)



Fonte: Acervo do autor

### 3.2.2 Polimento da superfície

Iniciou-se a etapa de polimento das regiões lixadas, onde essa etapa do processo garante que o ataque químico seja eficiente e não gere dúvidas no momento da análise. Para isto aplicou-se uma pasta de diamante de  $3\mu\text{m}$  sobre essas regiões. Com o auxílio de uma furadeira com controle de velocidade acoplado com um pano de polimento com um lubrificante azul LLF a região foi trabalhada até que toda a pasta terminasse e a superfície ficasse polida.

Figura 22 - Pasta de diamante aplicada (a) e polimento da superfície (b)



Fonte: Acervo do autor

### 3.2.3 Ataque químico

Para iniciar o ataque químico a área do anel a ser analisada foi limpa com álcool etílico e algodão e na sequência realizando a passagem de ar quente para retirar os resíduos do polimento. Como a geometria do corpo de prova não é plana, foi necessário realizar uma contenção para que o reagente permanecesse sobre a região, assim foi utilizado uma resina P80 Ra com cura rápida.

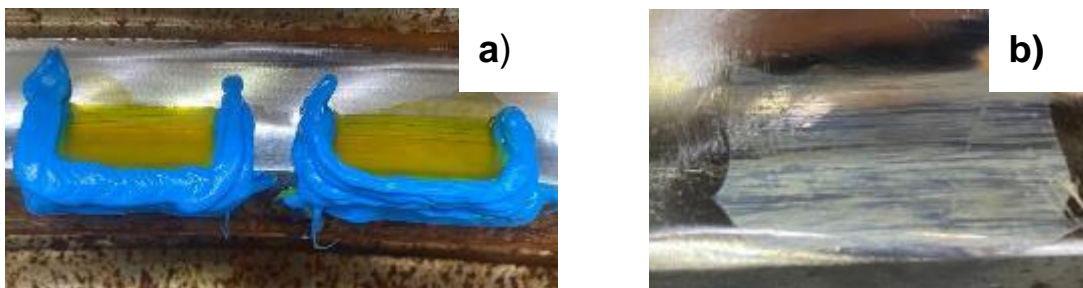
Figura 23 - Limpeza da região com solvente (a) e aplicação da resina de contenção (b)



Fonte: Acervo do autor

Com o auxílio de uma pipeta foi adicionado aproximadamente 50 ml do reagente 81 da ASTM E407, sobre a resina de contenção. Foi necessário aguardar por 15 minutos para que o ataque acontecesse de forma eficiente. Depois deste tempo, o reagente e a resina foram descartados e a região foi devidamente limpa com Acetona

Figura 24 - Ataque sobre a superfície (a) e resultado do ataque após limpeza com Acetona (b)

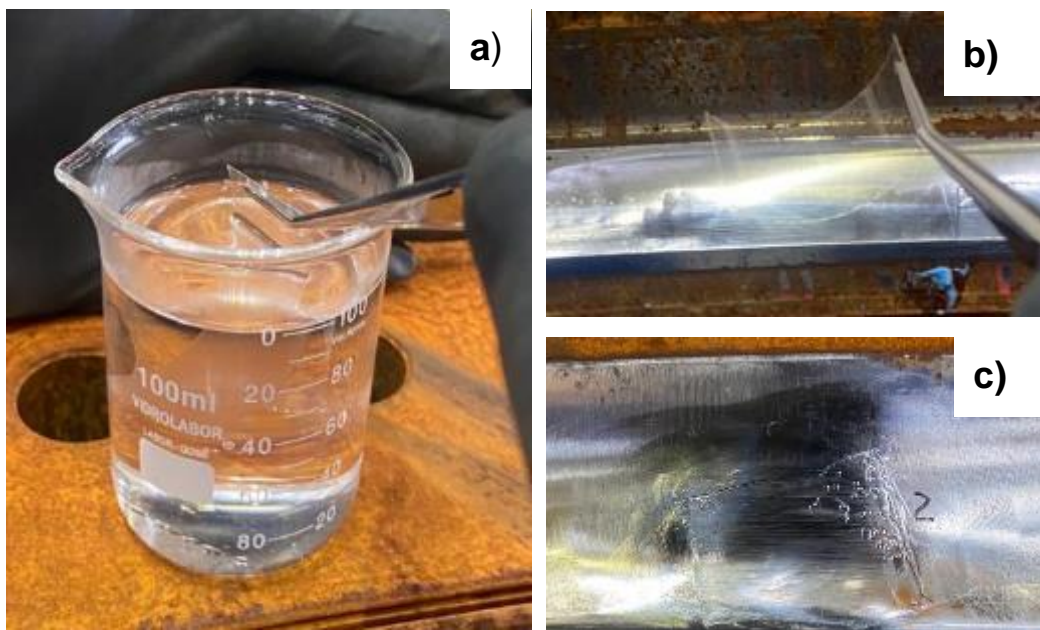


Fonte: Acervo do autor

### 3.2.4 Extração da réplica.

Adicionou-se cerca de 50 ml de acetona em um béquer e com o auxílio de uma pinça, a fita de acetato foi imersa no solvente por 35 segundos. Após este tempo a fita de acetato foi aplicada na superfície e aguardou-se 15 minutos. Retirou-se a fita da superfície e aplicou-se em uma lâmina de vidro para observação no microscópio e os resultados foram registrados.

Figura 25 - Impregnação da folha de acetato com acetona (a) a aplicação (b) e a folha aplicada na superfície (c)



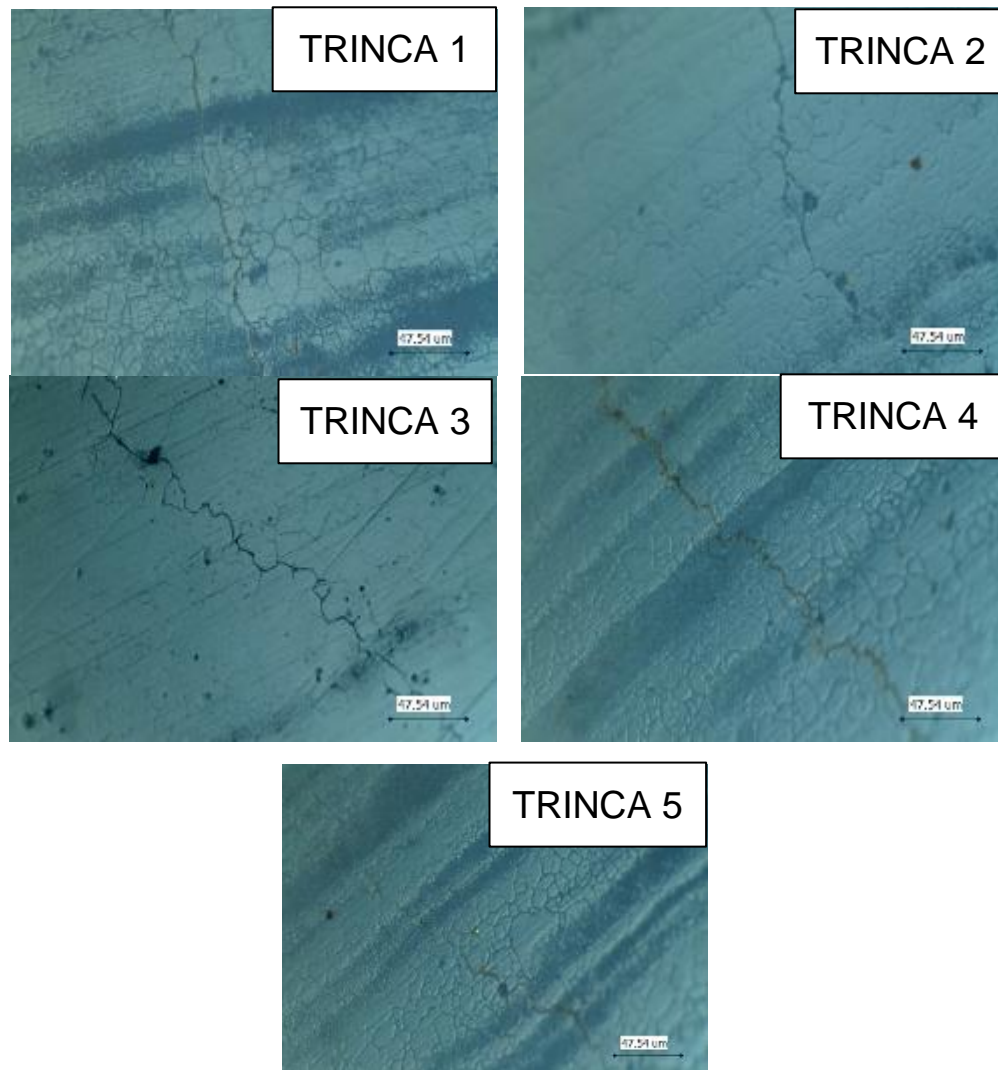
Fonte: Acervo do autor

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 RÉPLICAS METALGRÁFICAS

Os três corpos de prova passaram pela etapa de usinagem de desbaste e têmpera por indução, onde através do ensaio de partículas magnéticas foram identificadas 25, 46 e 140 trincas respectivamente, estas tinham comprimentos que variavam de 20mm a 50mm, todas na pista superior da face superior no sentido do raio. Todas as réplicas foram analisadas em microscópio óptico portátil da *Scientific* com ampliação de 10x e objetiva de 100x e os resultados podem ser visualizados a seguir:

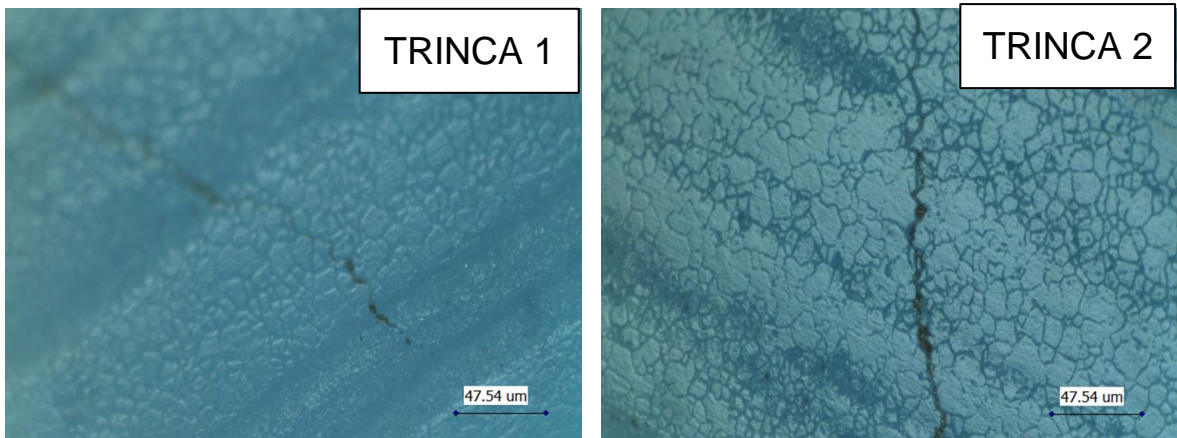
Figura 26 - Regiões fraturadas do primeiro corpo de prova com as trincas (1), (2), (3), (4) e 5, analisadas no microscópio óptico



Fonte: Acervo do Autor

As imagens obtidas acima mostram com clareza os contornos do grão da microestrutura, sendo que todas as trincas possuem a mesma morfologia e seguem um perfil sobre o contorno de grãos de maneira retilínea, contornam perfeitamente os grãos e mesmo nos casos onde se percebe uma pequena ramificação das trincas, como é o caso da segunda e da terceira imagem, ainda se mantém contornando os grãos, ou seja, é uma trinca intergranular.

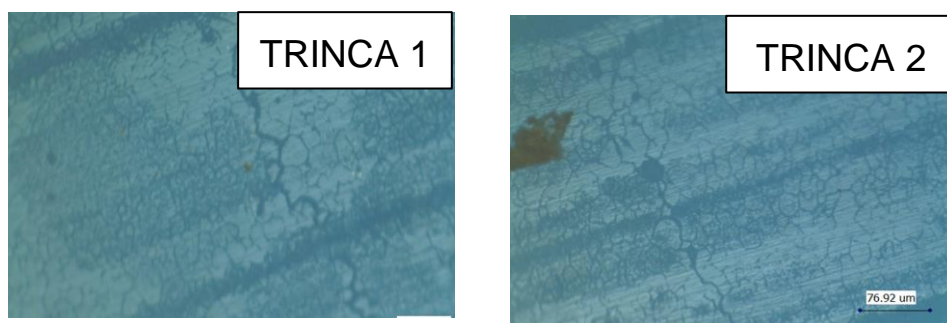
Figura 27 - Regiões fraturadas do segundo corpo de prova com as trincas (1), (2) analisadas no microscópio óptico



Fonte: Acervo do Autor

A primeira imagem contendo a "trinca 1" é a única em que não é possível observar com muita clareza os contornos de grãos e o perfil retilíneo de toda a extensão da trinca, porém ainda é possível observar que em vários pontos da trinca a mesma não rompe os grãos, mas sim os contorna. Na segunda imagem é possível visualizar com clareza a trinca seguindo o contorno dos grãos. Em ambos os resultados não há ramificações das trincas e podem ser consideradas como trincas intergranulares, pois contornam perfeitamente os grãos.

Figura 28 - Regiões fraturadas do terceiro corpo de prova com as trincas (1), (2) analisadas no microscópio óptico



Fonte: Acervo do Autor

O terceiro corpo de prova segue a mesma linha de resultados do primeiro, as imagens podem ser vistas com clareza onde observa-se que as trincas seguem uma mesma morfologia, contornam os grãos e possuem um perfil retilíneo e em ambas as imagens é possível visualizar ramificações em alguns pontos, dessa forma é possível definir que essas trincas são intergranulares.

Como já mencionado na metodologia deste trabalho, as etapas de preparação da superfície para obter as réplicas foram trabalhosas, pois a geometria da superfície não é plana, assim

dificuldades como remoção de riscos, polimento, ataque químico e aplicação da folha de acetato foram encontradas e mesmo com estes fatores os resultados encontrados foram satisfatórios.

Em todas as imagens foi possível observar com clareza o formato das trincas e como elas se propagam em toda a superfície, não deixando dúvidas que todas estas seguem o mesmo padrão de orientação: trincas intergranulares ou ainda trincas de contorno de grão, pois em nenhuma dos resultados encontrados ocorre o rompimento dos grãos e mesmo no caso onde há ramificações as mesmas se mantêm contornando o grão.

As trincas intergranulares são mais comuns em aços que possuem uma elevada dureza e que possuem um alto teor de carbono e alta liga e menos comuns em metais frágeis, pois estes costumam apresentar outros tipos de falhas. Este tipo de fratura costuma apresentar exatamente esta forma de propagação obtida nos resultados, independentemente do tamanho ou da profundidade, as trincas exibiram este perfil, visto que o reticulado cristalino é o ponto que possui a menor resistência e é exatamente sobre este contorno, o que sugere algumas causas específicas para a nucleação das trincas (BRAZ, 1999)

Como todos os anéis passaram pelo processo de têmpera por indução e pelo alívio de tensões, a microestrutura que levou a essa propagação das trincas, certamente é a martensita revenida, onde altos valores de dureza foram encontrados nas superfícies do anel. Mas, a explicação para o surgimento dessas trincas, certamente é a precipitação da fase frágil dos contornos de grão (BRAZ, 1999)

Segundo o ASM Handbook (1991), isso ocorre por um motivo muito comum em tratamentos térmicos: combinação inadequada de valores de temperaturas de resfriamento de pré-aquecimento, ou seja, uma ocorrência de processos que fragilizaram essas regiões e causaram esta trinca, sendo propagados na martensita revenida, microestrutura que apresenta valores de tenacidade baixos e por conta disso está mais propensa a trincas quando não se tem todos os parâmetros durante o tratamento controlado. O perfil de trincas intergranular é comumente ligado à formação de um filme, que se deposita na forma de carbonetos e a decomposição da austenita que ficou retida em filmes muito finos que geram uma alta instabilidade formando carbonetos grosseiros.

Dessa forma, foram realizadas diversas medições no forno industrial através de termopares de contato nas peças e foi constatado que temperaturas estabelecidas para pré-aquecimento não estavam sendo alcançadas, o que também impactou nas temperaturas de alívio de tensões. Após uma semana de análises, a engenharia de processo encontrou a causa raiz para estes problemas, os anéis estavam sendo empilhados dentro do forno sem separação alguma, o

que impedia a troca de calor de maneira eficiente em cada uma das peças, impossibilitando que a temperatura chegue no estabelecido.

Assim, confirma o primeiro ponto que o ASM Handbook (1991) apontou, a temperatura de pré-aquecimento é um problema que pode ocasionar trincas intergranulares. O pré-aquecimento é importante porque está relacionado com a diminuição do gradiente térmico da temperatura, onde com o aumento da mesma, de acordo com as especificações da peça, ocorre uma expansão térmica. Em seguida ocorre a mesma quantidade de contração térmica até o resfriamento, na mesma faixa de temperatura. Assim, se o material não é aquecido uniformemente podem acontecer resultando em distorções até alcançar o resfriamento. Outro ponto que foi levantado através de registros da produção é que dois destes três anéis foram induzidos com temperatura de resfriamento abaixo do mínimo recomendado, o que confirma o segundo ponto levantado pelo o ASM Handbook (1991) onde a temperatura de resfriamento é crítica para este tipo de processo. Para o processo de têmpera por indução, é recomendado que o polímero a base de água esteja em temperatura acima de 20°C, porém os mesmos foram induzidos com valores baixos, o que trouxe um sério impacto para o processo, pois é como se a têmpera estivesse sendo realizada com água pura, ou seja, um resfriamento brusco ocorreu, levando o surgimento das trincas na superfície do anel. O controle da temperatura de resfriamento é extremamente importante pois ela garante a formação da martensita com os valores de dureza esperados,

#### 4.2 ANÁLISE DE MODOS DE FALHA E SEUS EFEITOS (FMEA)

A ferramenta da qualidade foi utilizada seguindo o fluxograma apresentado na metodologia deste trabalho e foi analisada realizando um acompanhamento do processo de tratamento de térmico. Na parte de indutores a principal variável que ficou com RPN acima de 500 está relacionada com o dimensional dos indutores, pois foram realizadas diversas induções com estes fora de posição, isso ocorreu pois o indutor sofreu algum tipo de colisão e os operadores não perceberam que o dimensional estava incorreto.

Nos controles atuais foram identificados que não existe nenhuma mesa ou gabarito para que uma avaliação criteriosa seja realizada antes de iniciar a indução. Isso pode ser um grave problema, pois a indução com o indutor torto pode trazer baixos valores de profundidade de têmpera ou paradas de indução, o que levaria o retrabalho e uma possível trinca na pista.

Foi proposta uma solução para este problema, a fabricação dos gabaritos para cada modelo de indutor e uma mesa para que todos os reparos e avaliações dimensionais possam ser feitos

com total rigor, assim evitando que trincas possam surgir por conta da influência deste problema. Para as condições de temperaturas as principais variáveis que apresentaram valores acima de 500 estão relacionadas com as temperaturas de pré-aquecimento, de alívio de tensão e de resfriamento.

Foi comprovado através de acompanhamentos e registros nos cadernos da produção que induções foram realizadas com a temperatura de pré-aquecimento, resfriamento e procedimento de alívio de tensões com a temperatura abaixo do especificado, a explicação para isso, foi mostrada nos resultados das réplicas, mas a combinação destes fatores potencializa o surgimento de trincas.

A solução para este problema é simples e foi realizada imediatamente após a sua descoberta. Foram realizadas receitas com as temperaturas pré-estabelecidas para os procedimentos de pré-aquecimento e alívio de tensões, assim definindo o tempo de encharque dentro do forno. Para a solução de resfriamento, foi instalado um sensor que não deixa a máquina ligar caso a temperatura esteja abaixo do mínimo solicitado, assim controlando essas variáveis.

Para o material, a geometria e os parâmetros de máquina, foram identificadas algumas variáveis que podem trazer problemas, caso não sejam controladas, mas os controles atuais garantem que estas estejam estáveis. Por exemplo, para o material, problemas com a diferença na composição química; para a geometria, falhas de usinagem nas pistas; nos parâmetros, ciclos errados de potência, tensão e compensação, podem ser um problema para o processo e potencializar o surgimento de trincas.

Dessa forma, através do FMEA ficou evidente que a principal causa das trincas está relacionada com o não controle das condições de temperatura (pré-aquecimento, alívio de tensões e resfriamento) e com os problemas dimensionais nos indutores que causam a interrupção do sistema, gerando re-induções e aumentando a chance de trincas.

## **5. CONCLUSÃO**

Através da utilização de uma técnica não destrutiva, a réplica metalográfica, foi possível realizar uma análise nas superfícies dos anéis trincados, sem que houvesse a necessidade de cortá-los e levá-los a um laboratório, para que pudessem ser analisados, com isto os resultados foram obtidos de maneira mais rápida e conseguiram atender as expectativas. Com estes resultados obtidos foi possível realizar uma análise profunda utilizando conceitos de processamento de materiais metálicos com microscopia e evidenciou-se que as trincas foram

geradas por conta de problemas do processo, devido a condições inadequadas de temperatura, pois o perfil de propagação das trincas são 100% intergranulares. Com a utilização da ferramenta da qualidade o FMEA, foi possível identificar todas as causas que podem ser potencializadoras de trincas, ganhando destaque os indutores sem avaliações dimensionais e as condições de temperaturas inadequadas ao processo. Dessa forma, conclui-se que o presente trabalho foi extremamente importante para a consolidação do conhecimento e uma grande oportunidade para entender melhor como as trincas surgem, se propagam e se estabelecem em uma superfície e quais são as variáveis que devem ser controladas para que estas não apareçam e danifiquem as peças.

## 6. REFERÊNCIAS

- ABEEÓLICA. **Associação Brasileira de Energia Eólica**. Boletim anual, [2022]. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>. Acesso em: 25 nov. 2022
- AFFONSO, L. O. A. **Equipamentos mecânicos: análise de falhas e solução de problemas**. 2.ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005. 321p
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Brasília, DF: ANEEL, 2008. Disponível em <https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/sumario/sumario.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022
- AMARANTE, O. C. *et al.* **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília, DF: CEPEL, 2001. Disponível em [http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf). Acesso em: 03 jan. 2023
- ASM Handbook. **Heat Treating**. 6 ed. Ohio: *ASM International (American Society for Metals)*, 1991. 1012p
- BHADESIA, H. K. D. H. *Progress in materials Science*. **Steels for Bearings** [2011]. Disponível em [https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2011/Bearings/bearings\\_Bhadeshia\\_PMS\\_2012.pdf](https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2011/Bearings/bearings_Bhadeshia_PMS_2012.pdf). Acesso em: 14 jan. 2023.
- BRAZ, M. H. P. **Propriedades de fadiga de soldas de alta Resistência e Baixa Liga com Diferentes Composições Microestruturais**, 1999. Dissertação (Mestrado em engenharia de materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999. Disponível em <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-17102001-11717/publico/disheloisa.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2022
- BRESCIANI, F et al. **Conformação Plástica dos Metais**. 5ed. Campinas: Editora da Unicamp. 1997. 383p.
- CARLIN P. W *et al.* **The History and State of the Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology**. *National Renewable Energy Laboratory*. [2001]. Disponível em <https://www.nrel.gov/docs/fy01osti/28607.pdf>. Acesso em: 17 out. 2022
- CATÁLOGO VILLARES METALS. **Propriedade dos aços**, [2003]. Disponível em <http://www.villaresmetals.com.br>. Acesso em: 01 out. 2022
- CAVALCANTI, Z. V *et al.* **A importância da Revolução Industrial no mundo da tecnologia**, [2011]. Disponível em: [https://www.unicesumar.edu.br/epcc2011/wpcontent/uploads/sites/86/2016/07/zedequias\\_vieira\\_cavalcante2.pdf](https://www.unicesumar.edu.br/epcc2011/wpcontent/uploads/sites/86/2016/07/zedequias_vieira_cavalcante2.pdf). Acesso em 01 dez. 2022
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 6 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais (AB), 1988. 303p

DOYON, G *et al.* ***Elimination of straightening operation in induction hardening of automotive camshafts.*** [2016]. Disponível em [https://inductothermgroup.com/wp-content/uploads/Camshaft-Hardening\\_IJMMP.pdf](https://inductothermgroup.com/wp-content/uploads/Camshaft-Hardening_IJMMP.pdf). Acesso em: 19 set. 2022

FERREIRA, C. R. *et al.* **Tratamento térmico por indução eletromagnética em tubos de aço SAE 1045 para produção de hastes de sondagem geológica.** [2004]. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rem/v57n1/v57n1a05.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2022.

GOLDENBERG, J. L. O. **Energia e meio ambiente no Brasil. Estudos Avançados.** São Paulo, SP, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142007000100003>. Acesso em: 20 nov. 2022

GWEC. **Global Wind Energy Council.** Global Wind Report, [2022]. Disponível em <https://gwec.net/global-wind-report-2022>. Acesso em: 20 jan. 2023

JACOBSON, M. Z *et al.* ***Saturation wind power potential and its implications for wind energy.*** Cambridge, MA, 2012. Disponível em <https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.1208993109>. Acesso em: 02 jan. 2023

KANG, J *et al.* ***Microstructural characteristics and impact fracture behavior of a high-strength low-alloy steel treated by intercritical heat treatment.*** China, 2011. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509312008209#preview-section-introduction>. Acesso em: 14 jan. 2023

LOPES JUNIOR, G. S. **Determinação das propriedades físicas e mecânicas de um compósito cerâmico reforçado com produtos da combustão do carvão mineral,** 2011. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2011. Disponível em <https://www.repositoriobib.ufc.br/000020/00002039.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2023

MACEDO, Q. M. **Efeito dos parâmetros de austenitização sobre a microestrutura e propriedades do Aço 4130 submetido a tratamentos térmicos por indução eletromagnética, 2007.** Dissertação (Mestrado em engenharia de materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007. Disponível em <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2787>. Acesso em: 01 nov. 2022

MANWELL, J. F *et al.* ***Wind Energy Explained: theory, design and application. 2ed.*** Inglaterra: John Wiley & Sons, 2006. 704p.

MENEZES, G. A. C. **FMEA de processo na indústria automotiva: uma análise sobre a aplicação do Número de Prioridade de Risco (RPN).** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2020. Disponível em [https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/191819/menezes\\_cag\\_me\\_guara.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/191819/menezes_cag_me_guara.pdf?sequence=3&isAllowed=y). Acesso em: 06 out. 2022

MOREIRA, J. F. D. **Viabilidade Técnica/Econômica para Produção de Energia Eólica, em Grande Escala, no Nordeste Brasileiro.** 2009. Monografia (Especialização em Formas Alternativas de Energia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009. Disponível em <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/4551>. Acesso: em 20 out. 2022

NASCIMENTO, T. C *et al.* **Inovação e sustentabilidade na produção de energia: o caso do sistema setorial de energia eólica no Brasil.** Rio de Janeiro, RJ, 2012. Disponível em: <<http://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/cadernosebape/article/view/5488/4208>> Acesso em: 28 set. 2022

ROCHA, M. A. C. **Análise das propriedades Mecânicas do aço SAE 4140 com estrutura bifásica.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2004. Disponível em <https://app.uff.br/riuff/handle/1/19945>. Acesso em: 28 out. 2022

RODRIGUES, J. M. S. **Análise de Problemas de Rolamentos do Gerador em Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal.** 2016. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2016. Disponível em: <https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/36949/1/Tese%20de%20Mestrado%20Jo%C3%A3o%20Rodrigues.pdf>. Acesso em: 28 set. 2022

RUDNEV, V *et al.* **Handbook of Induction Heating.** 2 ed. Estados Unidos: CRC Press, 2017. 772p.

SHINOHARA, A. C *et al.* **O estudo do marco regulatório para produção sustentável.** Florianópolis, 2015. Disponível em: <https://producaoonline.org.br/rpo/article/view/1789>. Acesso em: 01 dez. 2022

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais.** 2ed. São Paulo: Editora Blucher, 2010. 576 p

TEIXEIRA, L. C *et al.* **Aplicação da Ferramenta FMEA em uma Indústria Têxtil de Pequeno Porte.** Santos, SP, 2019. Disponível em: [https://abepro.org.br/biblioteca/TN\\_STO\\_000\\_1636\\_37866.pdf](https://abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_000_1636_37866.pdf). Acesso em: 14 out. 2022

*Website Elotherm SMS. SMS Group.* [2023]. Disponível em <https://www.sms-elotherm.com/pt/>. Acesso em: 05 dez. 2022.

*Website Windbox. Eficiência em gestão operacional de parques eólicos.* [2022] Disponível em: <https://windbox.com.br/>. Acesso em: 20 dez. 2022

*Website Thyssenkrupp. Engineering.tomorrow.together.* [2022] Disponível em: <https://windbox.com.br/>. Acesso em: 28 dez. 2022