

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

GABRIEL MASCHIO

**ESTUDO DAS CORRELAÇÕES ENTRE TENSÕES RESIDUAIS EM TUBOS DE
AÇO E FALHAS EM USINAGENS SUBSEQUENTES**

CAXIAS DO SUL

2015

GABRIEL MASCHIO

**ESTUDO DAS CORRELAÇÕES ENTRE TENSÕES RESIDUAIS EM TUBOS
DE AÇO E FALHAS EM USINAGENS SUBSEQUENTES**

Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Mecânica apresentado como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico na Universidade de Caxias do Sul.

Supervisor: Dr. Gunther J. L. Gerhardt.

CAXIAS DO SUL

2015

GABRIEL MASCHIO

**ESTUDO DAS CORRELAÇÕES ENTRE TENSÕES RESIDUAIS EM TUBOS DE
AÇO E FALHAS EM USINAGENS SUBSEQUENTES**

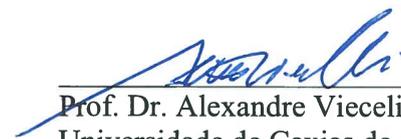
Trabalho de conclusão do curso de Engenharia
Mecânica apresentado como requisito para a
obtenção do título de Engenheiro Mecânico na
Universidade de Caxias do Sul.

Aprovado em 03/07/15.

Banca Examinadora



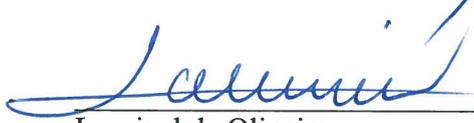
Prof. Dr. Gunther J. Lewczuk Gerhardt
Universidade de Caxias do Sul



Prof. Dr. Alexandre Vieceli
Universidade de Caxias do Sul



Prof. Me. Sérgio da Silva Kucera
Universidade de Caxias do Sul



Lourival de Oliveira
Weatherford Ind. e Com. Ltda

Dedico este trabalho aos meus pais Adelino e Teresinha, e a minha esposa Taíse pelo apoio, compreensão e carinho, não somente na execução deste trabalho, mas em todo período de estudo na Universidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, à minha família e esposa, por serem a base desta conquista.

Ao professor Gunther J. Lewczuk Gerhardt pela supervisão e auxílio indispensáveis na realização do trabalho.

Ao Lourival de Oliveira pelo suporte e apoio na realização deste trabalho junto à empresa.

À empresa Weatherford Ind. e Com. Ltda e seus colaboradores pela oportunidade de realização da pesquisa, fundamental para a conclusão deste trabalho.

À Universidade de Caxias do Sul por disponibilizar os Laboratórios de Tecnologia e Pesquisa para a realização dos ensaios necessários.

Ao pessoal do Laboratório de Caracterização Magnética da Universidade de Caxias do Sul, pela disponibilização dos equipamentos e instalações do laboratório.

A todos os amigos e colegas que contribuíram alguma maneira para a realização deste trabalho.

RESUMO

Tensões residuais estão presentes em praticamente todas as peças rígidas. Em muitos casos, elas são percebidas após operações de usinagem, onde a remoção de uma quantidade de material pode causar a reorganização ou o alívio destas tensões. Em alguns casos, isso resulta em deformações irreversíveis ao componente usinado. Tubos de aço sem costura, fabricados pelo processo de laminação a quente, e submetidos aos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, podem apresentar tensões residuais, as quais têm potencial de afetar a usinagem de peças ou componentes fabricados a partir desses tubos, especialmente quando a peça usinada apresenta geometrias esbeltas, com espessuras de paredes delgadas, ou cortes e seccionamentos. Neste trabalho foram estudadas as possíveis correlações entre tensões residuais presentes nestes tubos e deformações sofridas por peças cilíndricas com paredes delgadas após a usinagem. Para isso foram fabricadas dez amostras, as quais foram divididas dois grupos, sendo um deles submetido ao tratamento térmico de alívio de tensões antes da usinagem das peças. Isso resultou em vinte e cinco peças em forma de anel em cada grupo, onde foram aplicadas técnicas não destrutivas e medições manuais. A técnica do ruído Barkhausen foi utilizada com o intuito de identificar interferências das tensões residuais dos tubos nas deformações dos anéis. Foram identificadas algumas correlações entre os valores obtidos nas medições deste ruído com as dimensões finais apresentadas pelas peças. Concluiu-se também que as tensões residuais presentes nos tubos podem não ser as principais causadoras das deformações sofridas pelas peças após a usinagem, e que o alívio de tensões realizado antes da usinagem não foi capaz de evitar essas deformações.

Palavras-chaves: Tensões Residuais. Ruído Barkhausen. Alívio de Tensões. Deformações.

ABSTRACT

Residual stresses are present in practically all solid components. Sometimes, they are perceived after machining operations, where removing a material amount may cause stress reorganization or eventually its relieving. Sometimes, this results in irreversible strains to the machined component. Seamless steel tubes, furnished by a hot rolling process, and submitted to the heat treatments of quenching and tempering, may present residual stresses, which have potential to affect the machining of parts or components manufactured from these tubes, especially when the part has slender geometries, with thin wall thickness, or cutting and sectioning. In this work were studied possible correlations between residual stresses on these tubes and strains suffered by cylindrical parts with thin wall thickness after machining. For this, ten samples were machined and divided in two groups, one of which submitted to a stress relieving heat treatment before parts machining. This gives two groups of twenty five ring-shaped samples each, where nondestructive techniques as well as manual measurements were applied. The Barkhausen noise technique was utilized in order to identify any interference of tubes residual stresses on rings deformation. It was identified some correlations between the values obtained from noise measurements with the final dimensions shown by the parts. It was concluded also that the residual stresses present on the tubes cannot be the main causes of strains, and that the stress relieving done before machining was not able to avoid these strains.

Keywords: Residual Stresses. Barkhausen Noise. Stress Relieving. Deformations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Obturador de Topo Weatherford SwageSet®.....	14
Figura 2 - Relação entre tempo, temperatura, tensões e microestrutura.....	17
Figura 3 - Tipos Comuns de Extensômetros	22
Figura 4 - a) Interação entre os pólos de um material ferromagnético; b) pólos livres de um material ferromagnético.	26
Figura 5 - Formação dos Domínios Magnéticos	26
Figura 6 - Exemplo de uma Curva de Histerese Magnética	27
Figura 7 - Processo de magnetização de um material ferromagnético	28
Figura 8 - Descontinuidades no processo de Magnetização	29
Figura 9 - Bobina sensora captando ruído Barkhausen	30
Figura 10 - Ruído Barkhausen gerado pelos saltos Barkhausen	31
Figura 11 - Fluxograma das etapas do trabalho.....	32
Figura 12 - Dimensões das amostras após operação de desbaste	34
Figura 13 - Pontos de medição do ruído Barkhausen	35
Figura 14 - Gerador de função SRS DS360	36
Figura 15 - Amplificador bipolar Kepco BOP 36-6M	36
Figura 16 - Yoke e bobina sensora	37
Figura 17 - Filtro passa banda SRS SR640	37
Figura 18 - Representação Esquemática do Sistema de Medição do Ruído Barkhausen.....	38
Figura 19 - Sistema real de medição do ruído Barkhausen	38
Figura 20 - Envelope RMS das medições experimentais	39
Figura 21 - Posição de retirada de cada anel trava	40
Figura 22 - Detalhe do Rasgo Longitudinal do Anel Trava Weatherford 3090001403	40
Figura 23 - Anéis trava sem o rasgo longitudinal.....	41
Figura 24 - Anéis trava com o rasgo longitudinal	41
Figura 25 - Amostra piloto após torneamento	43
Figura 26 - Amostra piloto durante medição de ruído Barkhausen.....	43
Figura 27 - Medições de ruído Barkhausen com variação da amplitude.....	44
Figura 28 - Medições de ruído Barkhausen com variação da frequência.....	45
Figura 29 - Razão de áreas das regiões bruta e usinada	46
Figura 30 - Exemplo de gráfico do ruído Barkhausen.....	47

Figura 31 - Diferença do ruído Barkhausen entre os grupos de amostra	47
Figura 32 - Diferença de acabamento superficial entre os grupos de amostras	48
Figura 33 - Análise metalográfica de uma amostra do grupo dois	49
Figura 34 - Mapa da Área abaixo da curva – amostra 01 x 08.....	50
Figura 35 - Mapa do Maxbn – amostra 01 x 08	50
Figura 36 - Mapa de H - amostra 01 x 08.....	50
Figura 37 - Conversão de oito pontos em cinco regiões	51
Figura 38 - Sarea para cada grupo	52
Figura 39 - Sh para cada grupo.....	53
Figura 40 - Meda real x Meda teórico - grupo um	57
Figura 41 - Meda real x Meda teórico - grupo dois.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Química Percentual - Especificação Weatherford WS412.....	33
Tabela 2 - Propriedades Mecânicas – Especificação Weatherford WS412.....	33
Tabela 3 - Relação das amostras de cada grupo	34
Tabela 4 - Temperatura de Patamar - Especificação Weatherford WH141	35
Tabela 5 - Anéis aprovados de acordo com o desenho.....	54
Tabela 6 - Correlações do grupo um	56
Tabela 7 - Correlações do grupo dois	56
Tabela 8 - Modelo linear do grupo um	57
Tabela 9 - Modelo linear do grupo dois	58

LISTA DE SIGLAS

API	<i>American Petroleum Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Permeabilidade magnética do material [N/A ²]
χ	Susceptibilidade magnética [N/A ²]
V	Intensidade do ruído Barkhausen [mV]
N	Número de espiras da bobina sensora
V _{rms}	Voltagem RMS [mV]
NP	Número de pontos do intervalo
v _i	Voltagem de cada ponto [mV]
Maxbn	Ruído Barkhausen RMS máximo [mV]
H	Posição do pico do ruído Barkhausen RMS [A/m]
Sarea	Desvio padrão da área abaixo da curva do gráfico do ruído Barkhausen [mV.A/m]
Smaxbn	Desvio padrão do ruído Barkhausen RMS máximo [mV]
Sh	Desvio padrão da posição do pico do ruído Barkhausen [A/m]
Medb	Dimensão média do anel trava antes do corte [mm]
Varb	Varição da dimensão do anel trava antes do corte [mm]
Mínb	Dimensão mínima do anel trava antes do corte [mm]
Intb	Dimensão intermediária do anel trava antes do corte [mm]
Maxb	Dimensão máxima do anel trava antes do corte [mm]
Meda	Dimensão média do anel trava após o corte [mm]
Vara	Varição da dimensão do anel trava após o corte [mm]
Mína	Dimensão mínima do anel trava após o corte [mm]
Inta	Dimensão intermediária do anel trava após o corte [mm]
Maxa	Dimensão máxima do anel trava após o corte [mm]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	DESCRIÇÃO DA EMPRESA	15
1.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	15
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO	16
1.3.1	Objetivo geral.....	16
1.3.2	Objetivos específicos.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	TENSÕES RESIDUAIS	17
2.2	TIPOS DE TENSÕES RESIDUAIS	18
2.3	ORIGEM DAS TENSÕES RESIDUAIS	18
2.4	TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS	19
2.4.1	Técnicas Destrutivas.....	20
2.4.1.1	Técnica do Seccionamento	20
2.4.1.2	Técnica da Remoção de Camadas ou Deflexão.....	20
2.4.2	Técnicas Semi-destrutivas.....	21
2.4.2.1	Técnica do Furo Cego.....	21
2.4.3	Técnicas Não Destrutivas.....	22
2.4.3.1	Técnica da Difração de Raio-X	22
2.4.3.2	Técnica da Difração Nêutrons	23
2.4.3.3	Técnica de Ultrassom	24
2.4.3.4	Técnica do Ruído Barkhausen	24
2.5	ALÍVIO DE TENSÕES	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	32
3.2	AMOSTRAS	33
3.3	RUÍDO BARKHAUSEN	36
3.4	ANÉIS TRAVA.....	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
5	CONCLUSÕES.....	59
	BIBLIOGRAFIA	61
	ANEXO A - CERTIFICADO DA MATÉRIA PRIMA DAS AMOSTRAS.....	64
	ANEXO B - CERTIFICADO DO ALÍVIO DE TENSÕES.....	65

APÊNDICE A - RESULTADO DAS MEDIÇÕES DO RUÍDO BARKHAUSEN.....	67
APÊNDICE B - RESULTADO DAS MEDIÇÕES DE DIÂMETRO PRÉ CORTE	69
APÊNDICE C - RESULTADO DAS MEDIÇÕES DE DIÂMETRO PÓS CORTE	71

1 INTRODUÇÃO

Desde o início da construção de um poço produtor de petróleo e gás até o momento de sua entrada em produção, é realizada uma série de operações e o mesmo passa por várias fases ou estágios até que esteja pronto para trazer petróleo e gás até a superfície. Em cada uma destas operações são utilizados e instalados no poço uma grande diversidade de equipamentos, dentre os quais se destacam os que compõem os Sistemas de Liner, cuja utilização é crescente em função de suas características de economia, versatilidade e rapidez de operação (THOMAS, 2001).

Um Liner é instalado no poço na fase de perfuração. Seu topo fica ancorado próximo da extremidade inferior do revestimento anterior (THOMAS, 2001). Parte integrante de um Sistema de Liner, o Obturador de Topo tem por principal função prover uma vedação de proteção no espaço anular entre a parte externa do Liner e a parte interna do revestimento anterior onde o Liner é ancorado. A Figura 1 mostra um exemplo de Obturador de Topo.

Figura 1 - Obturador de Topo Weatherford SwageSet®



Fonte: Acervo Weatherford (2015)

Segundo Thomas (2001), Liner é uma coluna curta de revestimento. Desta maneira, os equipamentos que compõem um Liner têm seus diâmetros internos e externos limitados pelas especificações API, as quais são responsáveis por definir as dimensões dos revestimentos utilizados nos poços de petróleo e gás. Esta limitação de espaço requer que muitas das peças que compõem estes equipamentos sejam projetadas com paredes finas, em muitos casos associadas a tolerâncias dimensionais estreitas.

Em todos os ramos da indústria a busca por processos de fabricação otimizados visando à redução dos custos e tempos de fabricação é constante, pois isto pode ser um diferencial para uma empresa que tem por objetivo atrair clientes e absorver cada vez mais fatias de mercado. Neste cenário é de interesse industrial avaliar a relação entre tensões residuais presentes em tubos de aço utilizados para fabricação destas peças e desvios de forma apresentados por elas após sua usinagem, buscando caracterizar parâmetros que determinem a necessidade de uma alteração no processo para que sua fabricação seja possível.

Esta caracterização tornaria possível utilizar recursos ou cuidados especiais durante o processo apenas nos casos realmente necessários, além de reduzir as perdas relacionadas a refugo e retrabalho de peças fabricadas, mitigando ainda as chances de falha de um equipamento durante sua instalação ou retirada do poço.

1.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

O presente trabalho foi realizado na unidade de Caxias do Sul – RS da Empresa Weatherford International, e refere-se ao Estágio do Curso de Engenharia Mecânica pela Universidade de Caxias do Sul.

Presente hoje em mais de 730 localidades distribuídas por 100 países ao redor do mundo, com matriz sediada em Genebra – Suíça, a Weatherford iniciou suas atividades em Caxias do Sul ao adquirir uma fábrica originalmente fundada pela Empresa Engemaq S/A, que foi a primeira a fabricar equipamentos para completção de poços de petróleo no Brasil.

Atualmente, o carro chefe da fábrica da Weatherford em Caxias do Sul são os equipamentos de Liner, por tratar-se da única fabricante deste tipo de produto no território nacional e por ter adquirido ao longo dos anos larga experiência na fabricação e montagem destes equipamentos nas diferentes metalurgias utilizadas no mercado.

Além dos recursos fabris de usinagem, soldagem, tratamento superficial de fosfato de manganês e montagem, a empresa conta com um poço de testes, que possibilita a simulação da operação e instalação dos equipamentos produzidos e montados, também utilizado em testes de qualificação e validação de novos projetos.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Com o passar do tempo, ajustes foram feitos no processo de fabricação das peças, como por exemplo, a realização de um tratamento térmico de alívio de tensões nos materiais, os quais contribuíram para a diminuição das ocorrências destes desvios, porém sem a certeza de quais eram as suas causas. Assim sendo, identificou-se que um estudo da real existência e da possível correlação entre as tensões residuais presentes nos tubos usados para fabricação destas peças e as deformações apresentadas pelas mesmas após a usinagem seria de grande valia, buscando definir parâmetros que possam sinalizar os casos em que os desvios têm maiores chances de ocorrer.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.3.1 Objetivo geral

Identificar a existência de correlações entre as tensões residuais presentes nos tubos utilizados pela empresa com os desvios dimensionais e de forma verificados nas peças fabricadas a partir destes tubos.

1.3.2 Objetivos específicos

Baseados no objetivo geral foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) identificar as origens das tensões residuais e as possíveis formas de medição;
- b) estimar a representatividade destas tensões como fator causador de deformação nas peças após a usinagem;
- c) verificar a possibilidade de definir um valor ou parâmetro que sinalize a real necessidade da realização do alívio de tensões no material que será utilizado para fabricação das peças.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

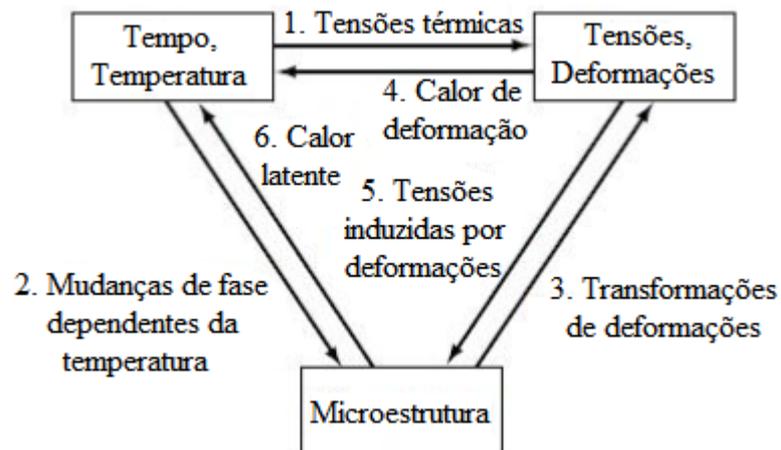
2.1 TENSÕES RESIDUAIS

Tensões residuais são frequentemente definidas como aquelas tensões que permanecem atuando em uma peça mecânica mesmo quando essa não está sujeita a nenhuma força externa. Presentes em praticamente todas as peças rígidas, elas são resultado dos processos mecânicos e metalúrgicos sofridos por cada ponto da peça e pela peça como um todo durante sua história. Essas tensões possuem comportamento elástico, podendo ser benéficas ou não às estruturas e equipamentos, dependendo de sua magnitude, sinal e distribuição (LU, 2005).

Tensões residuais podem ser introduzidas deliberadamente ou de forma acidental durante os diversos processos de fabricação, como tratamentos térmicos e operações de conformação mecânica de laminação e trefilação (SOARES, 1998).

Um estado de tensões residuais é consequência da interação entre tempo, temperatura, deformação e microestrutura. Algumas propriedades dos materiais que influenciam o desenvolvimento desse tipo de tensões incluem condutividade térmica, capacidade calorífica, coeficiente de expansão térmica, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, além de plasticidade e cinética de transformações (BHADESHIA, 2002). A relação entre tempo, temperatura, tensões e microestrutura é apresentada na figura 2.

Figura 2 - Relação entre tempo, temperatura, tensões e microestrutura



Fonte: Adaptado de Bhadeshia, 2002

2.2 TIPOS DE TENSÕES RESIDUAIS

As tensões residuais se dividem em macroscópicas ou tipo I, microscópicas ou tipo II e microlocalizadas ou tipo III. Essa divisão é feita de acordo com as distâncias em que eles mostram uma variação significativa.

Segundo Soares (1998), as tensões macroscópicas variam continuamente em distâncias da ordem das dimensões do corpo ou equipamento, estendendo-se ao longo do componente por vários grãos e equilibrando-se em todo o corpo. Tensões deste tipo podem ser encontradas em materiais que foram submetidos a algum tipo de deformação plástica não uniforme, como dobramento, processo de laminação, gradientes térmicos e têmpera de aços (HIRSCH; MACHADO; CAMPOS, 2006).

As tensões microscópicas por sua vez apresentam variações ao longo de distâncias da ordem das dimensões dos elementos microestruturais. Elas estão presentes em um grão ou em parte dele, equilibrando-se em grãos vizinhos (SOARES, 1998). Originam-se de deformações plásticas microscópicas.

Conforme Soares (1998), tensões microlocalizadas estendem-se por pequenas distâncias interatômicas dentro de uma pequena parte de um grão. Elas equilibram-se no próprio grão, dentro de uma pequena porção dele e têm origem em defeitos cristalinos, como discordâncias.

2.3 ORIGEM DAS TENSÕES RESIDUAIS

Segundo Soares (1998), tensões residuais macroscópicas podem ser introduzidas em uma peça ou material durante sua fabricação ou devido a deformações plásticas sofridas pelo componente durante sua utilização. Elas podem ainda ser introduzidas através de tensões originadas nos processos mecânicos como a laminação ou extrusão.

Conforme Ceglias (2012), a laminação é um processo importante na fabricação de tubos e que gera tensão residual. Durante este processo, ao ser aliviada a carga, as partes centrais do material, que escoaram menos, tendem a voltar ao seu tamanho inicial. Assim, as partes externas são forçadas a se comprimirem, uma vez que houve maior escoamento nesta porção do material, tornando-a acomodada num comprimento maior que o inicial. Assim, são geradas tensões residuais compressivas na superfície e tensões trativas na região central da peça.

Outro importante processo largamente utilizado na fabricação de tubos sem costura é a trefilação. Nela o tubo é submetido a uma redução de espessura de parede a uma temperatura abaixo da temperatura de recristalização, ou muitas vezes a temperatura ambiente. Este processo frequentemente gera no material tensões internas devido a incompatibilidade de deformações, que são os diferentes níveis de tensão a que diferentes pontos do material são submetidos ao mesmo tempo. Parte dessas tensões internas pode permanecer no material após o processo na forma de tensões residuais macroscópicas (WANG e GONG, 2002).

Uma grande parte dos tubos laminados ou trefilados, destinados à fabricação de componentes mecânicos, são submetidos a tratamentos térmicos para aumento de suas propriedades e características mecânicas. Segundo Soares (1998), os processos térmicos propiciam o aparecimento de tensões residuais, principalmente compressivas, devido ao resfriamento térmico, à deformação plástica e as mudanças de volume causadas pelas mudanças de fase.

De acordo com Chiaverini (2003), o tratamento térmico de têmpera consiste em resfriar bruscamente um material previamente aquecido além de sua temperatura de austenitização até a temperatura ambiente. Neste processo, a microestrutura do aço passa por mudanças de fase e tende a se transformar em martensita. Estas mudanças estruturais provocadas no material pelos processos de têmpera podem induzir nele tensões residuais (LU, 2002).

Soares (1998) afirma que todo componente mecânico tende a apresentar tensões residuais macroscópicas, devido aos processos de fabricação necessários à conformação do material à sua forma final. As tensões microscópicas também tendem a estar presentes, provenientes do processamento a que o componente foi submetido visando à alteração das qualidades microestruturais.

2.4 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS

Existe hoje uma série de técnicas conhecidas para medição de tensões residuais. Porém nem todas elas são capazes de medir peças ou componentes de todos os tamanhos, desde pequenos até muito grandes, como a estrutura de uma ponte. Dependendo das dimensões do item a ser medido e do método a ser utilizado, o componente pode ser levado até o instrumento, o instrumento pode ser levado até o local da medição, ou ainda em caso de peças de grande dimensão e massa, uma seção pode ser retirada da mesma para realização da

medição. Há, porém, que se ter muito cuidado na operação de seccionamento, pois ela pode alterar a magnitude das tensões existentes, aliviando-as ou inserindo novas tensões na amostra (RUUD, 2002).

Em sua obra, Ceglias (2012) afirma que as técnicas para medição de tensões residuais dividem-se em três categorias: destrutivas, semi-destrutivas e não destrutivas.

2.4.1 Técnicas Destrutivas

Caracterizam-se como destrutivas aquelas técnicas que impossibilitam a utilização do componente depois de realizadas as medições (CEGLIAS, 2012). Segundo Ruud (2002), técnicas de medição destrutivas são fundamentalmente baseadas no relaxamento ou alívio das tensões, ou seja, o valor das tensões é obtido através do alívio das tensões residuais em uma porção da peça ou componente e medição da variação de tensões causada por este alívio.

Soares (1998) indica que dentre os métodos de medição destrutivos destacam-se o de seccionamento e o de remoção de camadas ou deflexão.

2.4.1.1 Técnica do Seccionamento

Trata-se de um método utilizado principalmente para medição de tensões longitudinais. Consiste em cortar tiras longitudinais de uma peça ou componente e medir a variação no comprimento destas tiras após o corte. Este método se baseia no conceito de que as tensões residuais presentes no material são aliviadas com o seccionamento. O valor das tensões pode então ser obtido, com razoável precisão, através da Lei de Hooke (TEBEDGE; ALPSTEN; TALL, 1972).

2.4.1.2 Técnica da Remoção de Camadas ou Deflexão

Este método consiste em usinar ou remover, mediante um ataque químico eletrolítico, de forma gradual as camadas superficiais do componente. Quando as camadas de um material no qual há tensões residuais são removidas, o equilíbrio estático das forças e momentos internos é perturbado instantaneamente. Para restabelecer este equilíbrio, ocorrem deformações ou deflexões na forma do componente. A deflexão apresentada pelo componente pode ser relacionada às tensões residuais pré-existentes nas camadas removidas (NUNES, 2008).

2.4.2 Técnicas Semi-destrutivas

De acordo com Ceglias (2012), técnicas de medição de tensões residuais semi-destrutivas causam danos ao componente, mas estes danos não chegam a comprometer sua integridade e não impossibilitam sua utilização. Algumas das técnicas de medição classificam-se como semi-destrutivas, pois os danos que elas causam ao material podem ser reparados depois de realizadas as medições (RUUD, 2002).

Segundo Ruud (2002), as técnicas que são consideradas semi-destrutivas são aquelas que requerem que pequenos furos sejam feitos na peça, pequenos anéis sejam retirados do material ou entalhes sejam feitos na superfície do componente. Dentre estas técnicas, a mais comum e mais utilizada é a do furo cego.

2.4.2.1 Técnica do Furo Cego

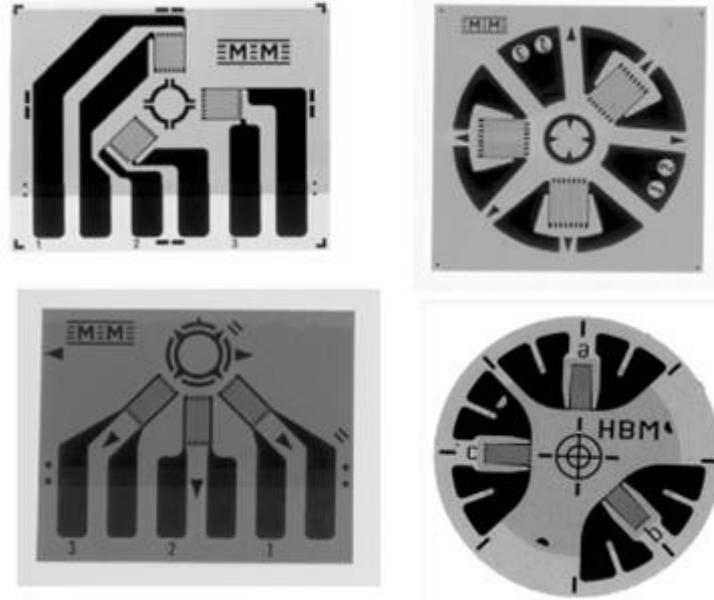
Este método baseia-se na medição da variação das tensões superficiais causada pelo alívio de tensões provocado pela usinagem de um furo cego, de pouca profundidade, na peça ou componente a ser ensaiado (RUUD, 2002). Este método é um dos mais utilizados para medição de tensões residuais, devido a sua rapidez e versatilidade, e por poder ser aplicado a uma grande variedade de materiais e componentes (NUNES, 2008).

Nunes (2008) explica que, para a realização das medições, extensômetros de três braços são instalados na região a ser medida. Após a fixação dos extensômetros, é feito um furo cego no material próximo a eles, cujo diâmetro varia de acordo com o material que se está analisando. Em teoria, após a realização do furo, os esforços causados pelas tensões presentes no material tendem a aliviar-se e diminuir na vizinhança do furo, causando deformações no material, que são captadas pelos extensômetros.

Nunes (2008) salienta que as medições das deformações devem ser feitas em três direções diferentes, para que seja possível comprovar que as tensões principais apresentam relação com a deformação radial medida pelos extensômetros.

Os tipos mais comuns de extensômetros utilizados nestas medições estão mostrados na Figura 3.

Figura 3 - Tipos Comuns de Extensômetros



Fonte: Adaptado de Grant; Lord; Whitehead, 2002

Nunes (2008) ainda cita que a especificação ASTM E-837 normaliza todos os aspectos referentes à realização das medições utilizando a técnica do furo cego.

2.4.3 Técnicas Não Destrutivas

Técnicas não destrutivas de medição de tensões residuais caracterizam-se por mensurar dimensões ou parâmetros físicos afetados na estrutura cristalina do material. Toda vez que é aplicada uma força em um material metálico, onde se gera uma tensão que é menor que a tensão de escoamento do material, este material se deforma elasticamente. Esta deformação causa alterações na estrutura atômica do material, e são estas alterações que as técnicas de medição não destrutivas mensuram (RUUD, 2002).

As principais técnicas não destrutivas de medição são a difração de raio-x, difração de nêutrons, ultrassom e o ruído Barkhausen.

2.4.3.1 Técnica da Difração de Raio-X

Este método baseia-se no fato de que quando um metal está sob tensão, seja ela residual ou resultado de uma força externa aplicada, ele sofre deformações elásticas, as quais causam alterações no espaçamento entre os planos cristalinos do material. A técnica de

difração de raio-x pode medir de forma direta este espaçamento entre os planos e, a partir desta medida, determinar as tensões presentes no material (NUNES, 2008).

Os metais são formados por átomos organizados em planos tridimensionais que formam os grãos. Assim a grande maioria dos componentes metálicos é formada de cristais microscópicos (grãos), organizados aleatoriamente de acordo com a estrutura cristalina do material e atômicamente ligados para formar um sólido. Quando este metal é exposto a uma tensão, deformações são produzidas na estrutura cristalina de cada grão. É possível afirmar, então, que tensões residuais são transformadas em deformações interatômicas (RUUD, 2002).

Segundo Ruud (2002), os valores das tensões residuais presentes no componente são obtidos a partir dos valores de deformações encontrados na difração de raio-x, associados às constantes elásticas conhecidas do material e assumindo-se que as deformações encontradas são proporcionais às tensões.

Uma das limitações desta técnica é o baixo poder de penetração dos raios-x. Em caso de necessidade de medições em grandes profundidades, pode se fazer necessária a remoção de camadas do material, o que tornaria a técnica destrutiva (SOARES, 1998).

2.4.3.2 Técnica da Difração Nêutrons

A técnica de medição por difração de nêutrons é capaz de mensurar as deformações elásticas provocadas pelas tensões residuais em componentes de aço relativamente espessos. Esta capacidade faz com que este método consiga medir tensões residuais internas em peças ou componentes sem a necessidade de seccionamento ou de remoção de camadas (RUUD, 2002).

Repper et. al. (2012) explicam que, devido ao alto poder de penetração dos nêutrons, esta técnica torna possível realizar medições de tensões residuais em materiais de grande espessura, tornando-a melhor que a técnica de difração de raio-x para determinação de tensões residuais internas. Soares (1998) afirma que esta técnica pode chegar a profundidades próximas ou 20 milímetros para medições realizadas em aços.

Assim como a medição por difração de raio-x, a difração de nêutrons mede o espaçamento entre os planos cristalográficos do material, espaçamentos estes que são afetados toda vez que o material está sob a ação de tensões residuais ou tensões provenientes de carregamentos externos (RUUD, 2002).

Segundo Ruud (2002), destaca-se como limitação desta técnica o fato de que o componente ou amostra a ser medido tem sempre que ser levado até o instrumento de

medição, pois este consiste basicamente de um reator nuclear. Além disso, cada medição de deformações leva mais de uma hora, e para a determinação de tensões simples em qualquer pequeno componente, há que se realizarem ao menos três medições, o que torna o processo caro.

2.4.3.3 Técnica de Ultrassom

De acordo com Soares (1998), esta técnica baseia-se na variação da velocidade das ondas sonoras provocadas pelas tensões presentes no material. Segundo Ruud (2002), esta variação se dá de forma aproximadamente linear. Estas tensões são medidas por meio da indução de ondas sonoras de altas frequências no material, medindo-se o tempo que estas ondas levam para atravessar a amostra.

Parâmetros como a variação da deformação e variação da densidade do meio, e características do material como densidade das discordâncias, textura metalográfica, fases e precipitados afetam diretamente a velocidade do som e, portanto, podem limitar a aplicação desta técnica (SOARES, 1998).

2.4.3.4 Técnica do Ruído Barkhausen

Cada material apresenta um comportamento diferente quando exposto a um campo magnético, e estas propriedades magnéticas do material originam-se essencialmente dos momentos magnéticos dos elétrons em camadas incompletas nos átomos e de elétrons desemparelhados na banda de condução, no caso dos metais (GUIMARÃES, 2009).

Segundo Cullity e Grahan (2009), todos os materiais têm algum valor de magnetismo, podendo ser classificados de acordo com ele. A classificação mais comum aplicada para este critério divide os materiais em:

- diamagnéticos como cobre (Cu);
- paramagnéticos como sódio (Na) e alumínio (Al);
- antiferromagnéticos como óxido de ferro (FeO) e óxido de manganês (MnO);
- ferromagnéticos como ferro (Fe), cobalto (Co) e níquel (Ni);
- ferrimagnéticos como o óxido de ferro (Fe₃O₄).

Os materiais das três primeiras divisões são comumente conhecidos como não magnéticos, devido ao seu baixíssimo potencial magnético. Já os materiais ferromagnéticos, classificação da grande maioria dos aços, e ferrimagnéticos caracterizam-se pela alta

susceptibilidade e permeabilidade magnética que apresentam. Entende-se por susceptibilidade a razão entre a magnetização apresentada por um material ao ser exposto a um campo magnético e o valor deste campo, enquanto a permeabilidade pode ser definida como a razão entre a soma da indução magnética e a magnitude do campo magnético aplicado (BAIOTTO, 2011).

A equação 1 relaciona a permeabilidade μ de um material a sua susceptibilidade χ (JILES, 1991):

$$\mu = \chi + 1 \quad (1)$$

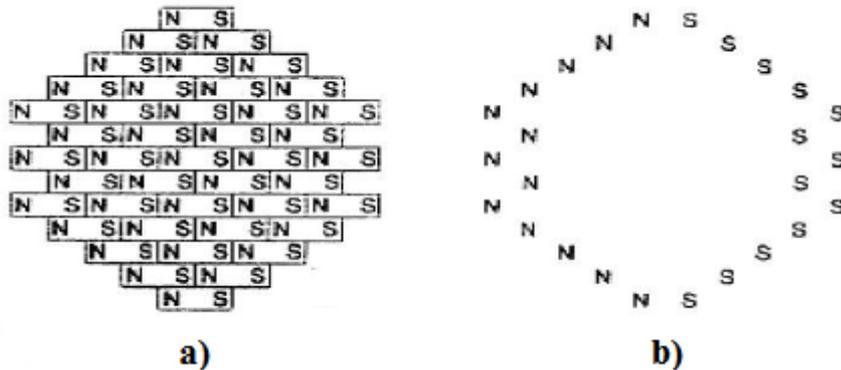
A técnica do ruído Barkhausen depende diretamente destas propriedades ou deste comportamento magnético dos materiais. Ela é definida por Ruud (2002) como a medição da quantidade e da magnitude de reorientações magnéticas bruscas provocadas por ciclos de expansão e contração dos domínios magnéticos em um material metálico e ferromagnético.

Estes domínios são regiões ordenadas, que surgem devido à tendência que os materiais ferromagnéticos têm de minimizar sua energia livre magnética, dentro das quais a magnetização aponta no mesmo sentido, sentido este que varia de região para região. Quando o material encontra-se no estado desmagnetizado, a orientação da magnetização dos domínios distribui-se de maneira que a amostra de material tenha magnetização nula (GUIMARÃES, 2009; BOHN, 2005).

Segundo Bohn (2005), os domínios magnéticos são separados por regiões de transição, denominadas paredes de domínios. Nesta região, a orientação da direção da magnetização tende a se afastar da orientação de magnetização do domínio e se aproximar da orientação do domínio vizinho.

Quando um material é magnetizado, os pólos livres presentes neste material, mostrados na figura 4, formam um campo desmagnetizante. A energia formada por este campo é chamada de energia magnetostática, que é a principal responsável pelo surgimento das estruturas dos domínios nos materiais ferromagnéticos (BOHN, 2005).

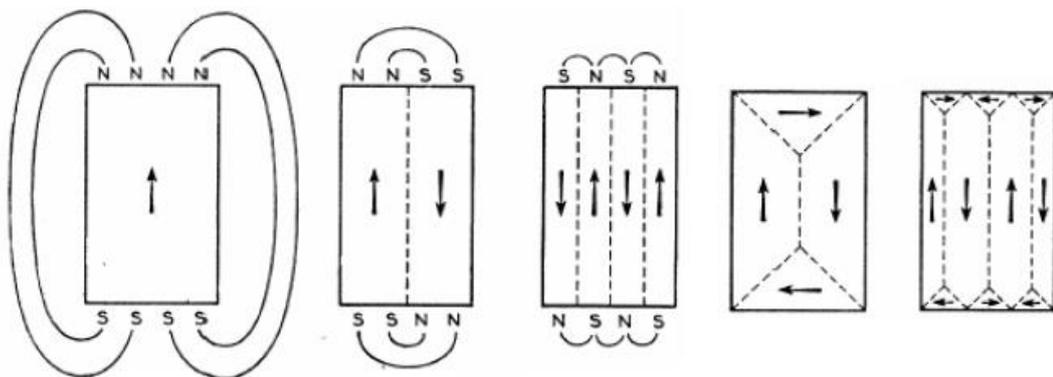
Figura 4 - a) Interação entre os pólos de um material ferromagnético; b) pólos livres de um material ferromagnético.



Fonte: Bohn, 2005

Considerando um material sendo magnetizado em uma única direção, este formaria um monodomínio. Nesta condição, pólos magnéticos seriam formados na superfície do material, criando um campo desmagnetizante intenso. Esse campo, por sua vez, geraria uma força magnetostática de grande valor. O material tende a dividir-se, então, em dois domínios magnetizados em direções opostas, reduzindo a energia magnetostática pela metade. O material continua a dividir-se em um maior número de polos até que a energia necessária para a criação de uma nova divisão seja maior do que a redução da energia magnetostática que esta nova divisão provocaria (BOHN, 2005). A figura 5 ilustra estas divisões.

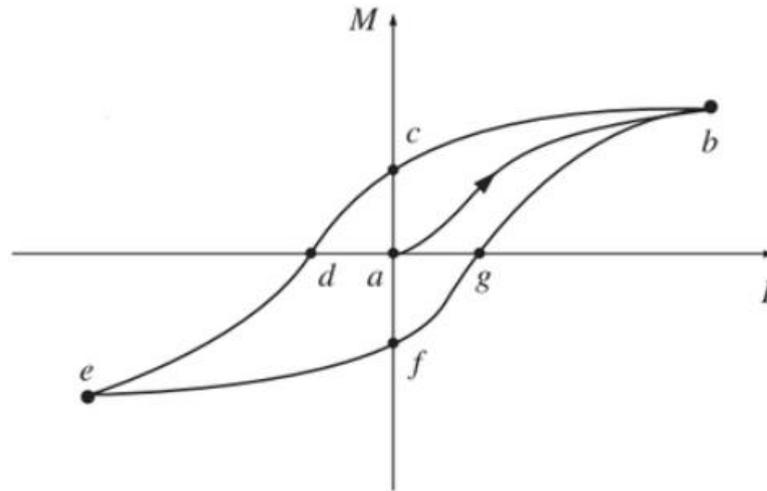
Figura 5 - Formação dos Domínios Magnéticos



Fonte: Adaptado de Bohn, 2005

Em se tratando de materiais ferrimagnéticos e ferromagnéticos, a curva de histerese magnética fornece grande parte das propriedades magnéticas do material. Um exemplo de curva de histerese está mostrado na figura 6.

Figura 6 - Exemplo de uma Curva de Histerese Magnética

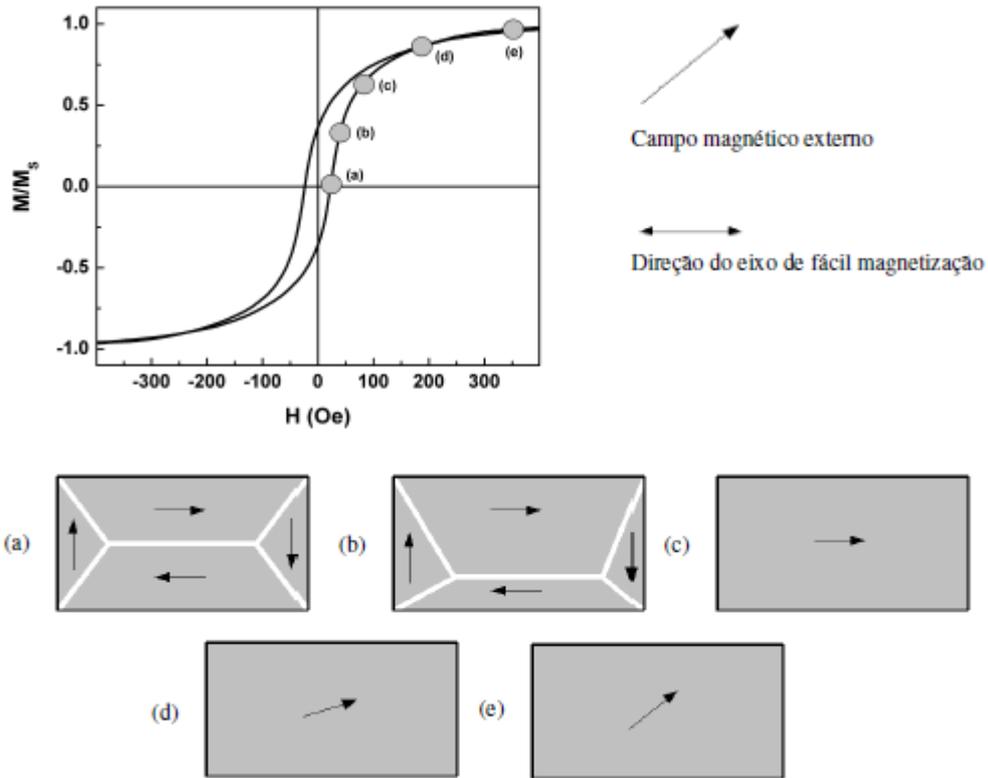


Fonte: Griffiths, 2011

Segundo Griffiths (2011), a magnetização de um material não depende somente do campo ao qual ele é submetido, mas também do seu histórico magnético. Os pontos “d” e “g” da curva caracterizam o campo coercivo, que se trata do campo necessário para anular a magnetização de um material anteriormente magnetizado. Os pontos “b” e “e” representam a saturação magnética, ponto onde todos os domínios magnéticos do material estão apontando para a direção do campo magnético aplicado. Já os pontos “c” e “f”, por sua vez, indicam a remanência, que é a indução que o material apresenta quando é saturado e em seguida o campo é extinto.

A figura 7 mostra o processo de magnetização de um material ferromagnético, caracterizando a possível estrutura dos domínios magnéticos em alguns pontos deste processo. Considera-se que a amostra do material está sob a ação de um campo magnético externo cuja direção constante está indicada na figura, e que tem seu valor aumentado de zero, em (a) até um valor máximo, em (e). No ponto (a) da curva, tem-se o material desmagnetizado. No ponto (b), devido ao aumento do campo magnético ao qual o material está exposto, tem-se o aumento dos domínios que apontam na direção do campo. Em (c), a magnetização já está orientada paralelamente aos eixos de fácil magnetização. A partir do ponto (c), o processo de magnetização resume-se principalmente a rotação da direção da magnetização, atingindo-se o ponto (d), onde os domínios aproximam-se da direção do campo aplicado. Em (e), tem-se a saturação, onde os domínios apontam na direção do campo magnético (BOHN, 2009).

Figura 7 - Processo de magnetização de um material ferromagnético



Fonte: Adaptado de Bohn, 2009

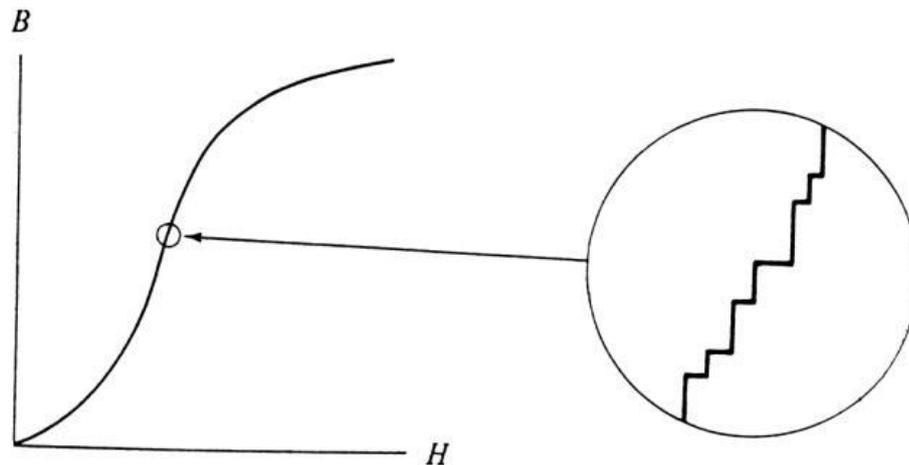
De acordo com Durin e Zapperi (2004), H. Barkhausen foi o responsável pela descoberta da grande maioria dos elementos envolvidos no ruído de magnetização. Através da experiência realizada por ele em 1919, pôde ser observada a primeira evidência dos domínios magnéticos. Em sua experiência, Barkhausen enrolou uma bobina secundária em torno de uma amostra de ferro que estava exposta a um campo magnético variável. Fazendo uso de um amplificador e de um alto-falante, ele pôde escutar um ruído que foi atribuído às mudanças de direção bruscas dos domínios magnéticos (JILES,1991; BOHN,2005).

Segundo Stupakov *et al* (2011), o ruído Barkhausen, como ficou conhecido o ruído identificado por H. Barkhausen em sua experiência, se origina de movimentos irreversíveis e descontínuos das paredes dos domínios magnéticos do material durante sua magnetização. Em sua obra, Bohn (2009) relata que o ruído Barkhausen corresponde à impressão do “*craking noise*” em sistemas magnéticos.

A expressão “*craking noise*” pode ser definida como o sinal irregular que um sistema emite como resultado ou reação a uma força externa que varia de forma lenta e suave no tempo. O “*craking noise*” é normalmente caracterizado por irregularidades ou pulsos, conhecidos como avalanches, abruptos e de tamanhos muito diferentes, separados por

períodos de inatividade. Este sinal é considerado uma característica própria de cada sistema, portanto ele geralmente fornece informações sobre o processo físico que o gerou (BOHN, 2009). A figura 8 mostra um exemplo destas irregularidades em um processo de magnetização.

Figura 8 - Descontinuidades no processo de Magnetização



Fonte: Jiles, 1991

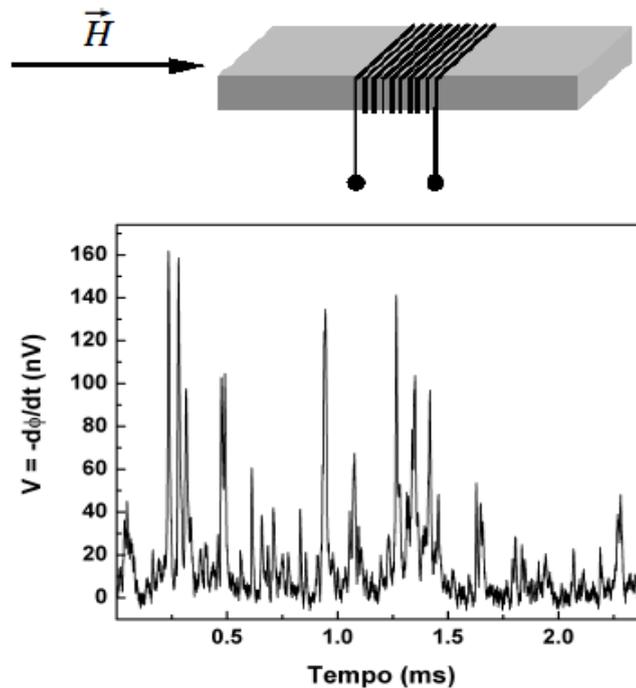
O ruído Barkhausen pode ser definido, de forma mais precisa, como o ruído correspondente às séries no tempo de pulsos de tensões detectados por uma bobina sensora envolta em uma amostra de material ferromagnético, estando esta amostra exposta a um campo magnético variável (BERTOTTI, 1998; BOHN, 2009). Os movimentos súbitos e irreversíveis das paredes dos domínios magnéticos que causam este ruído ficaram conhecidos como saltos Barkhausen. DESVAUX et.al. (2004) define ainda o ruído Barkhausen como sendo ondas eletromagnéticas produzidas pelas variações do fluxo magnético em um material, variações estas que são causadas pelos movimentos bruscos das paredes dos domínios magnéticos do material que ocorrem quando este está sob a ação de um campo magnético variável. O nível deste ruído pode ser definido pela Lei de Faraday-Lenz, mostrada na equação 2, onde N é o número de espiras da bobina e $d\theta/dt$ é a taxa de variação do campo magnético aplicado (CULLITY; GRAHAN, 2009).

$$V = -N d\theta/dt \quad (2)$$

Em resumo, as irregularidades presentes no processo de magnetização, mostradas anteriormente na figura 8, caracterizam-se os saltos Barkhausen. Segundo Bohn (2009), a

derivada da curva de magnetização em relação ao tempo resulta em um sinal proporcional ao ruído Barkhausen captado por uma bobina sensora. A figura 9 ilustra uma amostra de material envolta em uma bobina sensora, e o ruído Barkhausen captado por esta bobina.

Figura 9 - Bobina sensora captando ruído Barkhausen

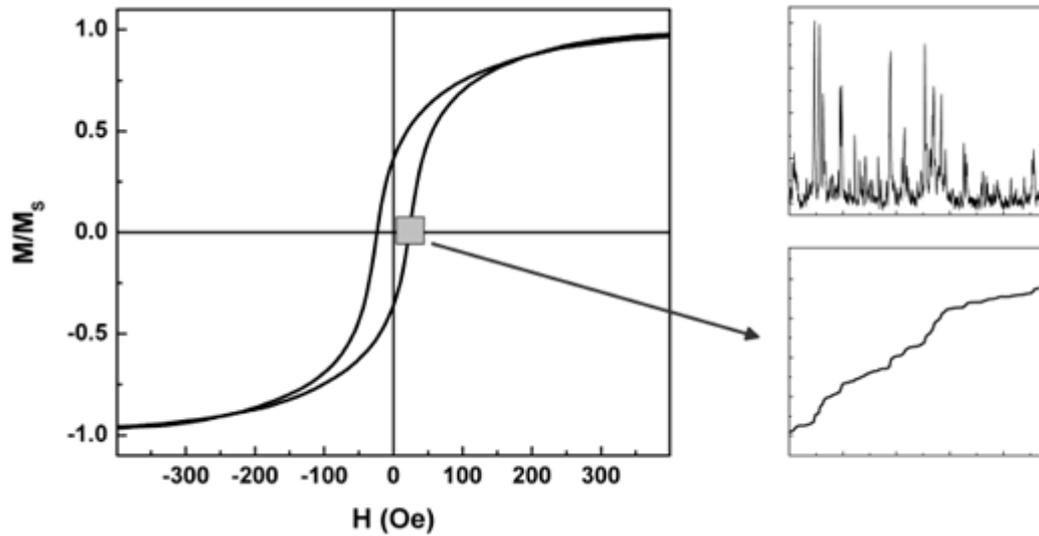


Fonte: Adaptado de Bohn, 2009

A figura 10, por sua vez, mostra a relação entre o ruído Barkhausen captado pela bobina sensora e os saltos Barkhausen presentes no processo de magnetização.

Segundo Cullity e Grahan (2009), tensões residuais presentes em um material podem ser um obstáculo à movimentação das paredes dos domínios. É possível, portanto, relacionar de forma comparativa, alterações causadas nos níveis do ruído Barkhausen captado pelas bobinas sensoras aos valores de tensões residuais presentes em diferentes amostras de material (ŽEROVNIK; GRUM, 2009). Santa-aho et al. (2014) afirmam que o ruído Barkhausen é sensível a tensões residuais presentes no material, uma vez que estas tensões afetam diretamente a maneira como as paredes dos domínios magnéticos se movimentam. Ruud (2002) ressalta que, dentre suas limitações, a utilização do ruído Barkhausen para medição de tensões residuais fica restrita a materiais ferromagnéticos.

Figura 10 - Ruído Barkhausen gerado pelos saltos Barkhausen



Fonte: Bohn, 2009

2.5 ALÍVIO DE TENSÕES

Em operações de tratamento térmico em materiais que possuam tensões residuais, estas podem aparecer na forma de empenamentos ou fissurações durante o resfriamento, principalmente em peças de grandes seções. Uma das maneiras conhecidas para eliminação destas tensões é o tratamento térmico de alívio de tensões (CHIAVERINI, 2003).

Segundo Chiaverini (2003), o tratamento térmico de alívio de tensões consiste em aquecer lentamente o material até uma temperatura logo abaixo da temperatura crítica, manutenção desta temperatura por um determinado período de tempo e após resfriá-lo, também de forma lenta, até a temperatura ambiente. Os parâmetros do tratamento, como temperaturas e taxas de aquecimento e resfriamento, são definidos de acordo com o material e com a geometria do componente. Uma vez que o tratamento sempre acontece abaixo da temperatura crítica, o material não sofre alterações estruturais ou de suas propriedades mecânicas.

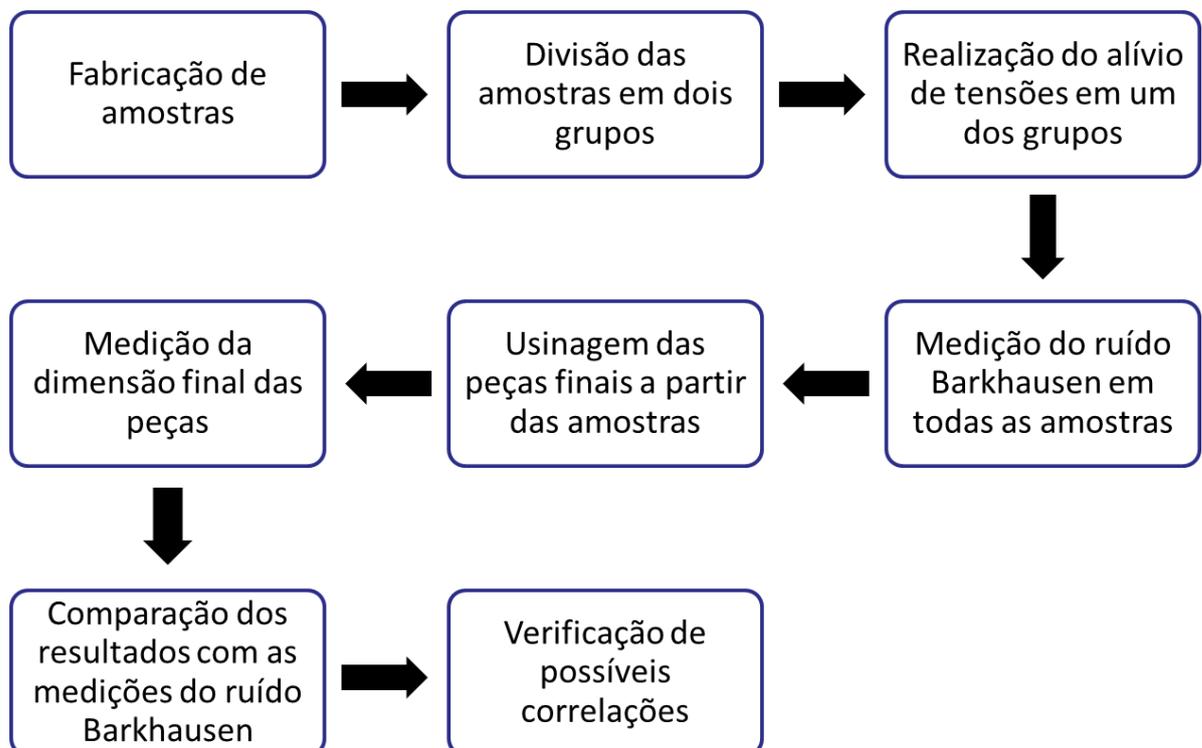
3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo tem como objetivo um maior detalhamento sobre o objeto de estudo deste trabalho, e das etapas realizadas visando atingir os objetivos propostos para o mesmo.

3.1 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Visando atingir os objetivos propostos para este trabalho, foram definidas as etapas mostradas no fluxograma da figura 11. As etapas de fabricação das amostras, além da usinagem após as medições do ruído Barkhausen foram realizadas dentro da estrutura da empresa Weatherford Caxias do Sul. A etapa de tratamento térmico foi realizada por uma empresa qualificada e homologada pela Weatherford. As medições do ruído Barkhausen por sua vez foram feitas na Universidade de Caxias do Sul.

Figura 11 - Fluxograma das etapas do trabalho



Fonte: Autor

3.2 AMOSTRAS

Para a execução do trabalho, foram fabricadas dez amostras, produzidas a partir de um material de acordo com a especificação Weatherford WS412, cuja composição química está mostrada na tabela 1.

Tabela 1 - Composição Química Percentual - Especificação Weatherford WS412

Classe		C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo
4140	Mín.	0,38	0,75	-	-	-	0,80	0,15
	Máx.	0,43	1,00	0,35	0,03	0,025	1,10	0,25

Fonte: Acervo Weatherford (2015)

O material utilizado na fabricação das amostras é adquirido diretamente de usinas, na forma de tubos redondos sem costura, fabricados pelo processo de laminação a quente, submetidos aos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento para atender as propriedades mecânicas da especificação Weatherford WS412, propriedades estas mostradas na tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades Mecânicas – Especificação Weatherford WS412

	Tensão de Escoamento	Limite de Resistência à Tração	Alongamento	Redução de Área	Dureza
Mín.	758 MPa (110 ksi)	862 MPa (125 ksi)	15%	40%	28 HRc
Máx.	Ver nota	1138 MPa (165 ksi)	-	-	37 HRc

Nota: A Tensão de Escoamento máxima deve ser uma razão de 0,93 do Limite de Resistência à Tração.

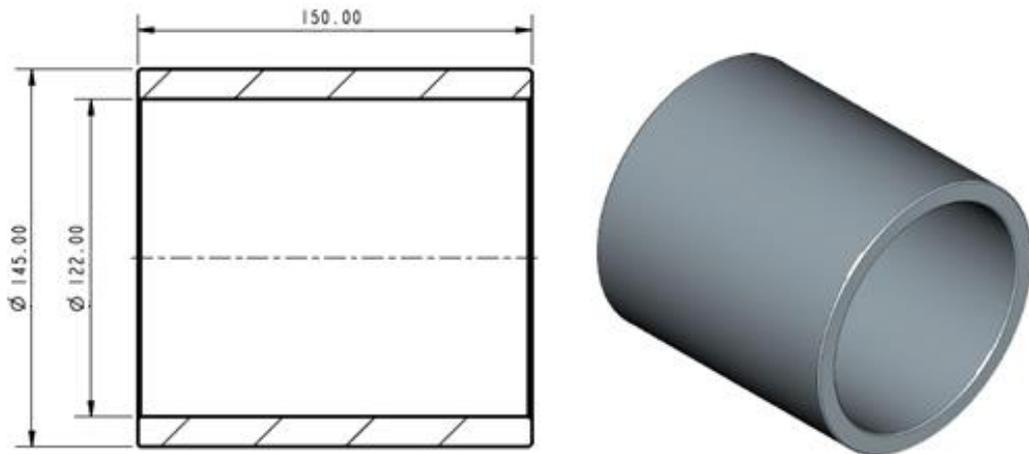
Fonte: Acervo Weatherford (2015)

O Anexo A traz o certificado da matéria prima utilizada na fabricação das amostras, o qual é disponibilizado pelo fabricante do material. Nele constam informações sobre o lote do material como sua composição química e propriedades mecânicas.

Para a confecção das amostras, os tubos foram primeiramente serrados em seções de aproximadamente 150 milímetros de comprimento. Após, os tubos passaram por um pré-desbaste, onde foram submetidos a um processo de torneamento, no qual foi removido um sobremetal de material nos diâmetros interno e externo de cada amostra. Este desbaste foi feito com o intuito de remover a camada superficial de carepas e oxidação presentes nos tubos, provenientes dos processos de laminação e tratamentos térmicos, e do tempo em que o material ficou exposto ao ambiente durante o transporte e a armazenagem.

Após a etapa de pré-desbaste, as amostras ficaram com as dimensões do esboço apresentado na figura 12.

Figura 12 - Dimensões das amostras após operação de desbaste



Fonte: Autor

Após o pré-desbaste, as amostras foram divididas em dois grupos compostos de cinco amostras cada. O segundo grupo foi encaminhado para realização do tratamento térmico de alívio de tensões, executado conforme parâmetros da especificação Weatherford WH141, enquanto o primeiro grupo não foi submetido a qualquer tipo de tratamento. A tabela 3 traz a relação das amostras que compõem cada grupo.

Tabela 3 - Relação das amostras de cada grupo

Grupo	Amostra
1	1, 2, 3, 4 e 5
2	6, 7, 8, 9 e 10

Fonte: Autor

A norma WH141 especifica a temperatura de patamar para realização do alívio de tensões de acordo com a classe e o limite de resistência ao escoamento do material, conforme mostrado na tabela 4. Essa norma também especifica que o material deve ser mantido a esta temperatura entre duas e quatro horas, descontados o tempo de aquecimento e resfriamento.

O Anexo B traz o certificado do tratamento térmico de alívio de tensões realizado no segundo grupo de amostras.

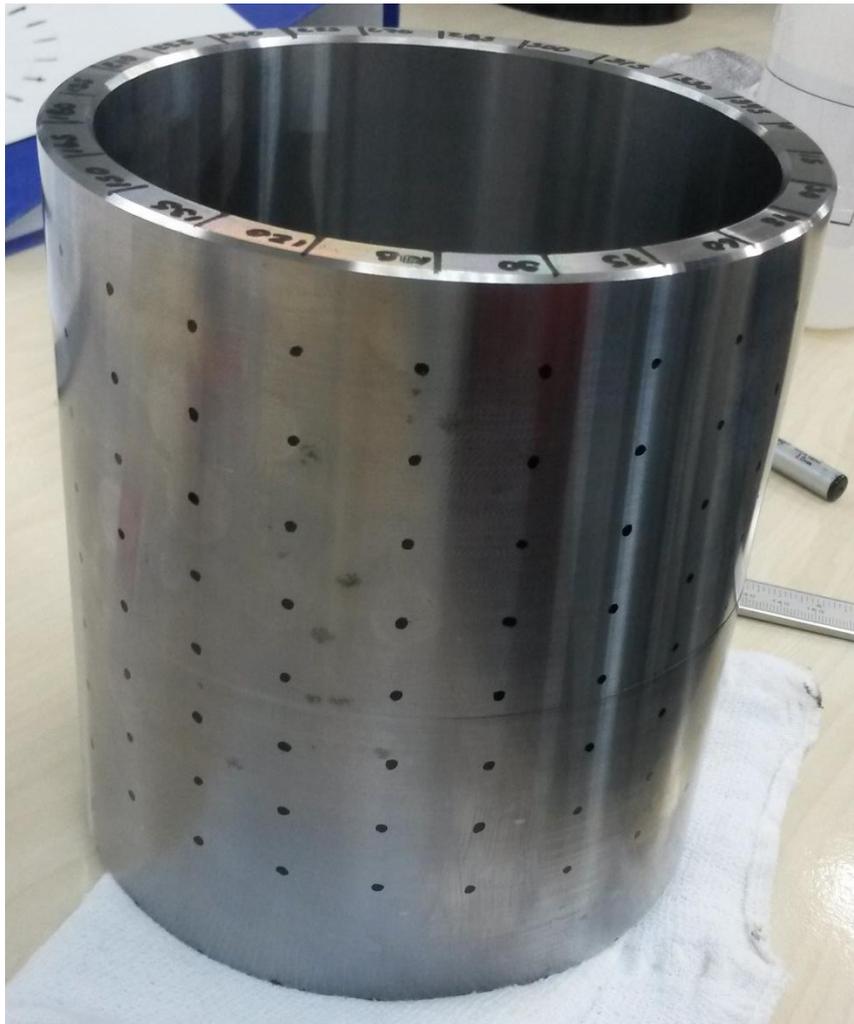
Tabela 4 - Temperatura de Patamar - Especificação Weatherford WH141

Classe	Tensão de Escoamento MPa	Temperatura °C
4140	620 a 758	470

Fonte: Acervo Weatherford (2015)

Finalizada a fase de tratamento térmico de alívio de tensões, foram identificados em cada amostra os pontos onde seriam realizadas as medições do ruído Barkhausen. Com o intuito de mapear a superfície das amostras, foram demarcados pontos radialmente a cada 15°, e longitudinalmente a cada 15 milímetros, totalizando 192 pontos de medição em cada amostra. A figura 13 mostra uma das amostras do primeiro grupo, já com os pontos de medição do ruído Barkhausen marcados em sua superfície.

Figura 13 - Pontos de medição do ruído Barkhausen



Fonte: Autor

3.3 RUÍDO BARKHAUSEN

Para analisar as tensões residuais presentes em ambos os grupos de amostras utilizou-se a técnica não destrutiva do Ruído Barkhausen. As medições foram feitas utilizando um sistema construído na Universidade de Caxias do Sul, composto de um gerador de função, modelo Stanford Research Systems DS360, que emite um sinal senoidal ou triangular em baixa frequência, neste caso 4 Hz, que é mostrado na figura 14.

Figura 14 - Gerador de função SRS DS360



Fonte: Autor

Este sinal tem como função acionar um amplificador bipolar, modelo Kepco BOP 36-6M, apresentado na figura 15, que por sua vez aciona um *yoke* construído de lâminas de FeSi, o qual é responsável por magnetizar a amostra quando colocado em contato com a mesma.

Figura 15 - Amplificador bipolar Kepco BOP 36-6M



Fonte: Kepco Inc., 2015

O ruído Barkhausen é captado por uma bobina sensora, construída de fios de Cobre, enrolados sobre um conjunto de laminas do mesmo material do *yoke*. A figura 16 mostra o *yoke*, à esquerda da figura, ao lado da bobina sensora.

Figura 16 - *Yoke* e bobina sensora



Fonte: Autor

O sinal do ruído Barkhausen captado é filtrado e amplificado por um filtro passa banda, modelo Stanford Research Systems SR640, apresentado na figura 17.

Figura 17 - Filtro passa banda SRS SR640

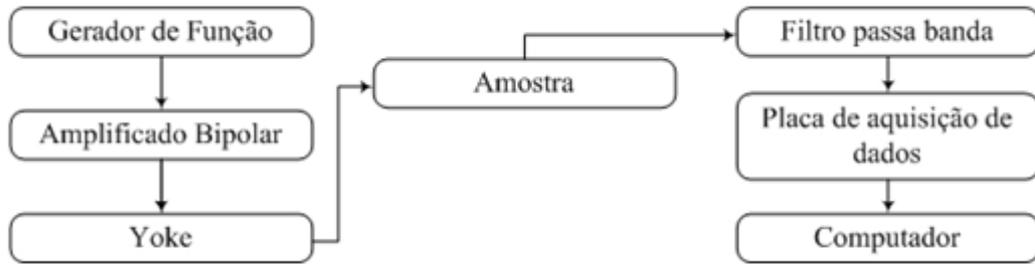


Fonte: Stanford Research Systems, 2015

As medições foram realizadas com taxas de 250000 pontos por segundo, e transferidas para um computador através de uma placa de aquisição de dados, modelo IOtech 16 bit ADC 1 MHz.

A figura 18 mostra um esquema resumido do sistema utilizado para medição do ruído Barkhausen.

Figura 18 - Representação Esquemática do Sistema de Medição do Ruído Barkhausen



Fonte: Autor

A figura 19, por sua vez, apresenta o sistema real durante uma das medições.

Figura 19 - Sistema real de medição do ruído Barkhausen



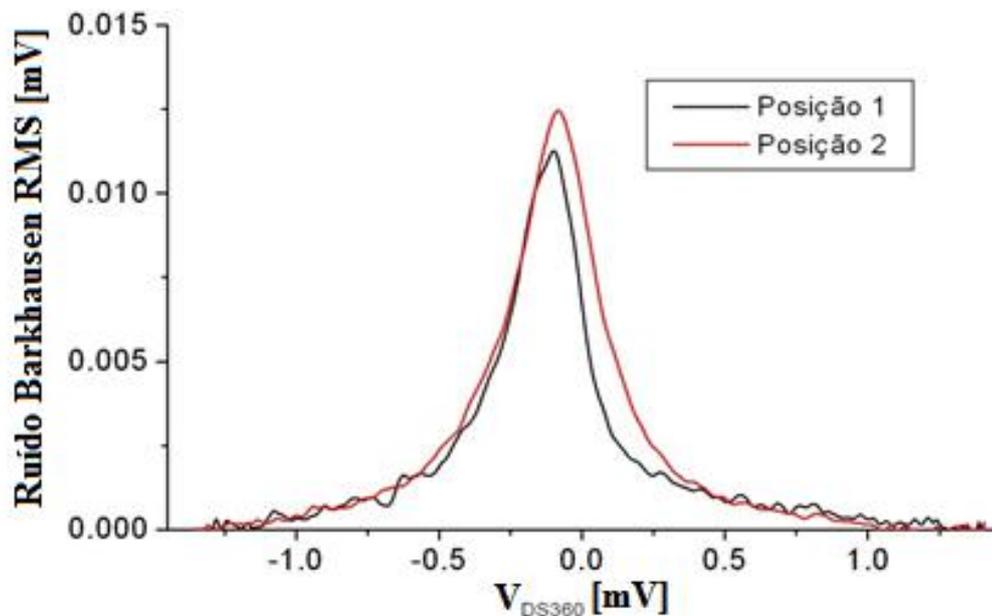
Fonte: Autor

Antes de iniciar a fabricação das amostras deste estudo, duas medições do ruído Barkhausen foram realizadas em um retalho de material, com dimensões próximas as das amostras que seriam utilizadas nos testes, em posições aleatórias na sua superfície, para verificação da intensidade do ruído emitido pelos tubos utilizados pela empresa. Os resultados obtidos são mostrados sob a forma do envelope RMS do ruído Barkhausen em cada medição. O envelope RMS é obtido calculando-se a voltagem RMS, para um pequeno intervalo de pontos consecutivos, que deve ser menor que 1% do total de pontos da medição. A voltagem RMS é calculada através da equação 3, onde V_{rms} é a própria voltagem RMS, NP é o número de pontos do intervalo, e v_i é a voltagem em cada ponto.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{NP} \sum_{i=1}^{NP} v_i^2} \quad (3)$$

Este cálculo é repetido então para o próximo intervalo de pontos, até que todos os pontos coletados na medição tenham sido considerados nos cálculos. Os resultados são então plotados em um gráfico. A figura 20 mostra o envelope RMS obtidos nas duas medições experimentais realizadas na amostra piloto.

Figura 20 - Envelope RMS das medições experimentais

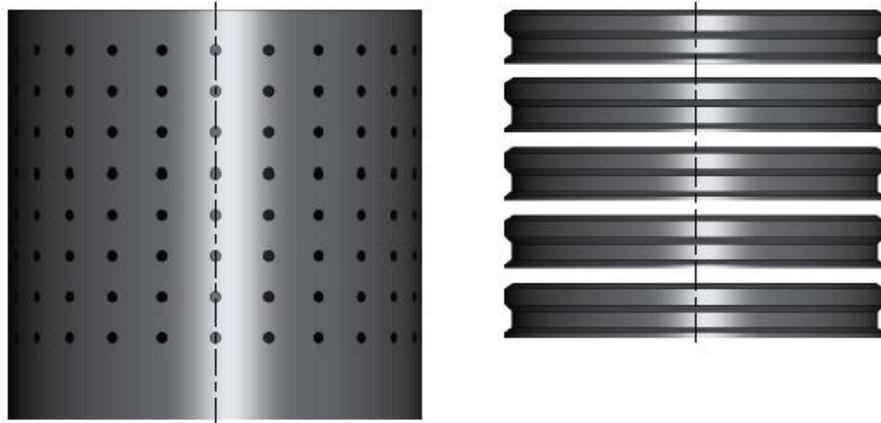


Fonte: Autor

3.4 ANÉIS TRAVA

Depois de concluídas as medições do ruído Barkhausen, as amostras passaram por processos de usinagem diversos, a fim de obterem o formato final das peças acabadas denominadas anéis trava. De cada amostra de 150 milímetros de comprimento foram fabricados cinco anéis trava, conforme mostrado na figura 21. A posição de retirada de cada anel trava é definida pela espessura de cada anel somada à espessura da ferramenta utilizada para a operação de sangramento, que é de aproximadamente 3 milímetros.

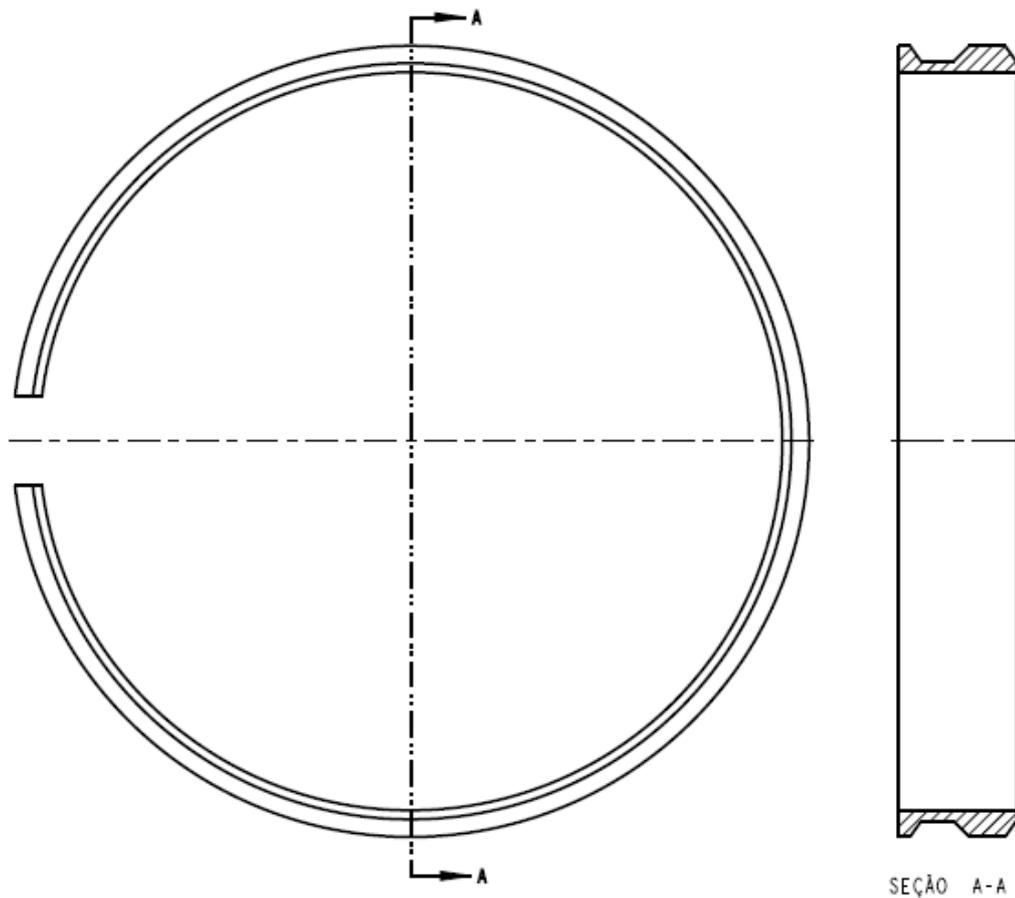
Figura 21 - Posição de retirada de cada anel trava



Fonte: Autor

Após a última etapa do processo de usinagem, onde é feito no anel trava um corte na direção longitudinal, as peças apresentam o formato mostrado na figura 22.

Figura 22 - Detalhe do Rasgo Longitudinal do Anel Trava Weatherford 3090001403



Fonte: Acervo Weatherford (2014)

A figura 23 mostra um grupo de cinco anéis trava, provenientes de uma mesma amostra, após a primeira etapa de torneamento, porém ainda sem o rasgo longitudinal.

Figura 23 - Anéis trava sem o rasgo longitudinal



Fonte: Autor

Já a figura 24, apresenta outro lote de cinco anéis trava finalizados, após a execução do rasgo longitudinal.

Figura 24 - Anéis trava com o rasgo longitudinal



Fonte: Autor

O foco deste trabalho é verificar as deformações sofridas pelos anéis trava após a execução deste corte longitudinal, e buscar possíveis correlações com as medições de ruído Barkhausen.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As medições experimentais descritas anteriormente e mostradas na Figura 19 foram realizadas com parâmetros de frequência e amplitude de 0,5Hz e 1Vrms, respectivamente. Uma vez que a amostra piloto utilizada nas medições experimentais era de um material de composição química e propriedades mecânicas muito similares as das amostras dos grupos um e dois, mesmo não sendo do mesmo lote de material, esperava-se que, utilizando-se estes mesmos parâmetros de frequência e amplitude para os ensaios reais, fossem obtidos sinais de ruído Barkhausen próximos aos obtidos nas medições experimentais. Considerando ainda que a amostra piloto não havia sido submetida a qualquer operação de limpeza ou usinagem e, portanto, apresentava acabamento superficial bruto, proveniente dos processos de laminação, têmpera e revenimento, era esperado que as leituras das medições das amostras do grupo um, grupo das amostras que não foram submetidas ao alívio de tensões, apresentassem resultados com menos interferências, onde o ruído Barkhausen ficaria mais evidente, visto que a superfície das amostras deste grupo apresentava acabamento limpo, sem oxidação e carepas, proveniente do processo de torneamento. Entretanto, ao iniciar as medições da primeira amostra do grupo um, praticamente não se obteve resposta de ruído Barkhausen com os parâmetros iniciais de frequência e amplitude.

Baseado na similaridade entre o material da amostra piloto e das amostras dos grupos um e dois descrita anteriormente, considerou-se que a única característica que seria significativamente distinta entre a amostra piloto e o grupo um seria o acabamento superficial. Foram realizadas então novas medições experimentais na amostra piloto, com a intenção de avaliar qual o reflexo da diferença de acabamento superficial do material sobre o ruído Barkhausen e definir novos parâmetros de frequência e amplitude para as medições nas amostras dos grupos um e dois. Para verificar esse efeito, uma parte da amostra piloto foi submetida a um processo de torneamento, para remover a carepa superficial e deixá-la com acabamento semelhante ao das amostras do grupo um. A figura 25 apresenta a amostra piloto após a operação de torneamento, onde a porção da amostra mais a esquerda da figura apresenta acabamento bruto, e a porção mais a direita da figura apresenta acabamento usinado, muito próximo ao acabamento das amostras do grupo um.

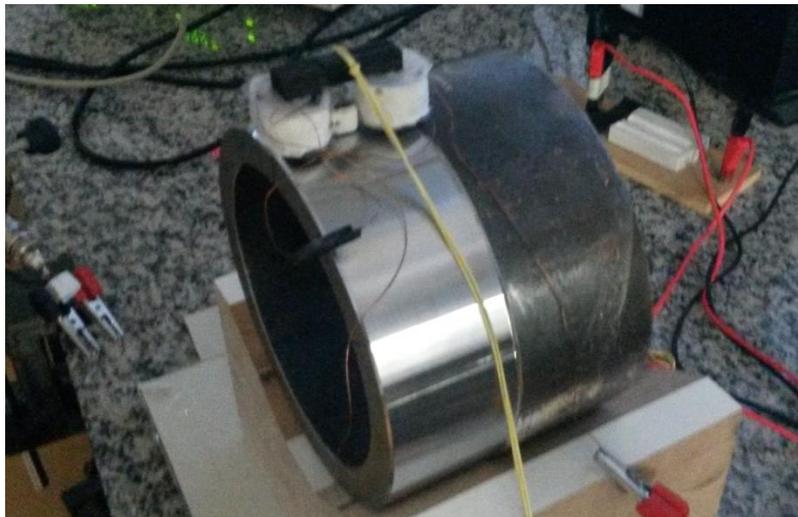
Figura 25 - Amostra piloto após torneamento



Fonte: Autor

Foram feitas medições do ruído Barkhausen sobre a área com acabamento bruto e sobre a área com acabamento usinado, utilizando os parâmetros de frequência e amplitude definidos anteriormente. A figura 26 mostra a amostra piloto durante uma das medições na região usinada.

Figura 26 - Amostra piloto durante medição de ruído Barkhausen

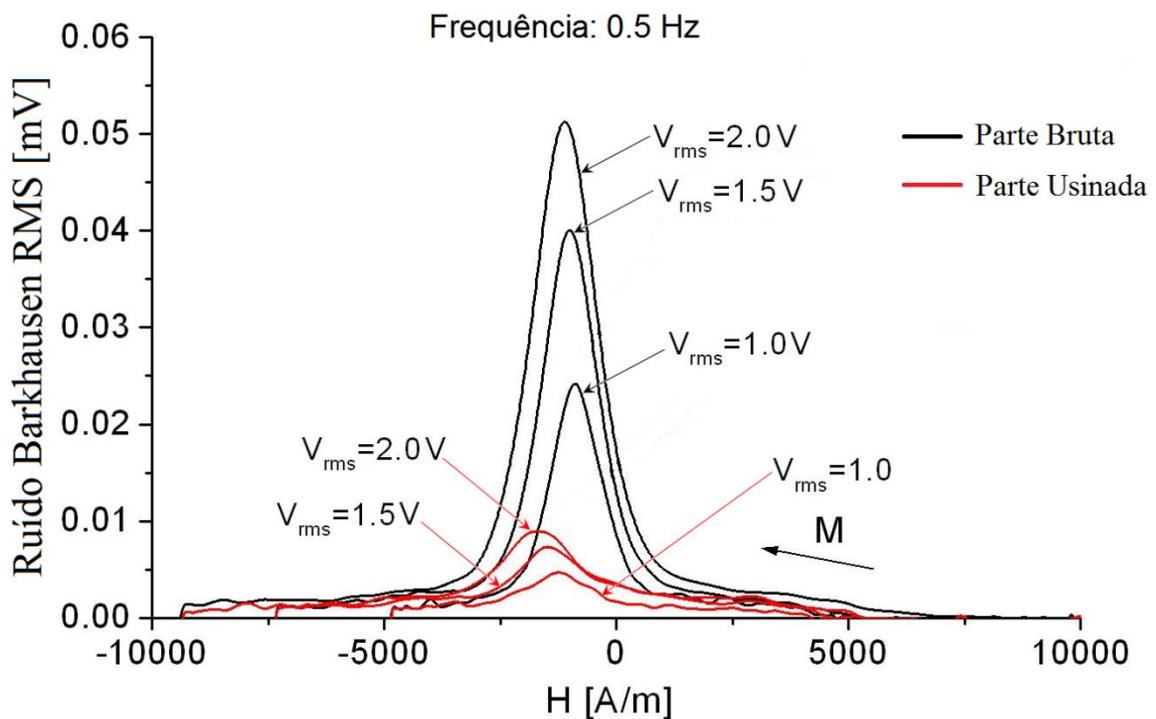


Fonte: Autor

Constatou-se que o ruído obtido em cada região da amostra apresentava intensidades distintas. Enquanto na região em bruto o ruído foi perceptível, na região usinada foi observado um sinal de baixa intensidade, que quase não podia ser captado, comprovando que os inesperados baixos valores de ruído Barkhausen obtidos nas primeiras tentativas de medição da amostra do grupo um eram consequência do acabamento superficial da amostra. A partir daí, buscou-se variar os parâmetros de medição, avaliando qual era a resposta do ruído Barkhausen a estas variações.

Primeiramente, manteve-se a frequência fixada em 0,5 Hz, e variou-se a amplitude entre 1 V_{rms}, 1,5 V_{rms} e 2 V_{rms}. A figura 27 mostra os resultados destas medições, onde as curvas em vermelho representam as medições feitas na parte usinada da amostra, enquanto as curvas em preto representam as medições feitas na sua parte bruta.

Figura 27 - Medições de ruído Barkhausen com variação da amplitude



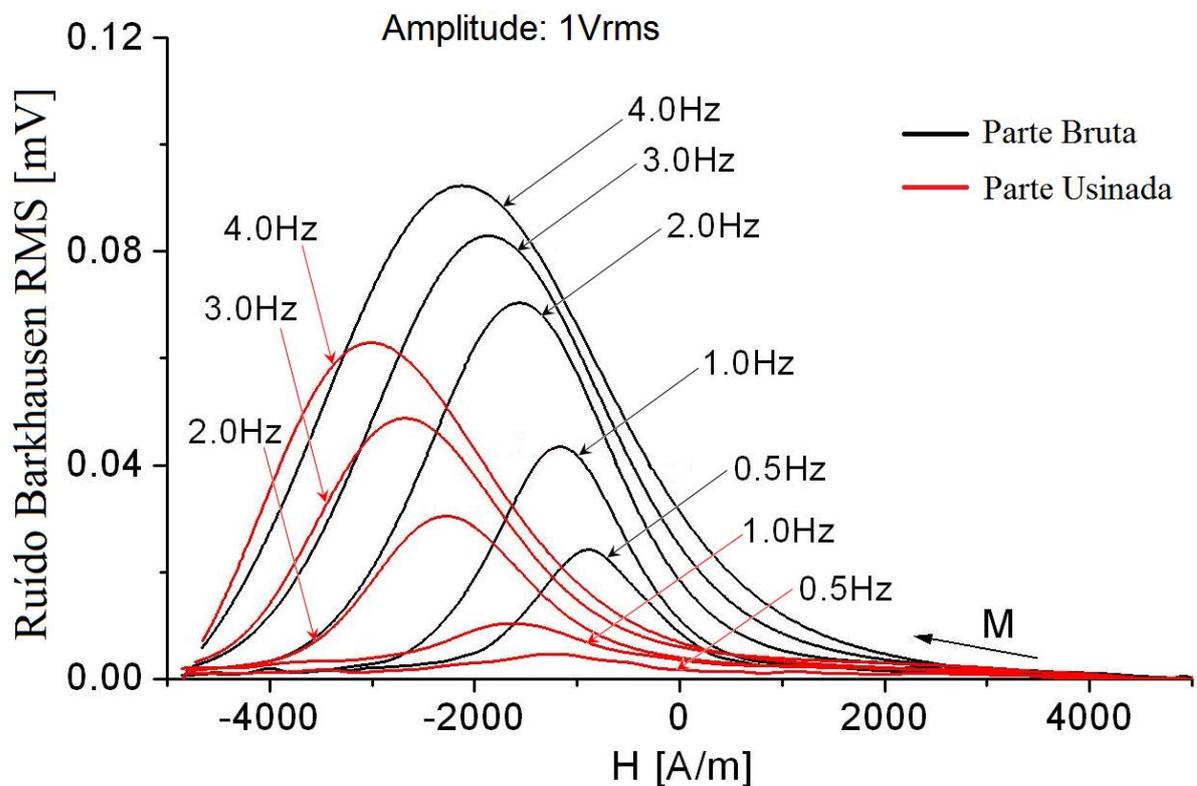
Fonte: Autor

Observa-se que as medições realizadas na parte usinada da amostra piloto apresentam valores de ruído baixos quando comparados aos resultados obtidos na parte não usinada, para todos os valores de amplitude utilizados. É possível observar também que à medida que a amplitude aumenta, a resposta da amostra, em forma de ruído, também aumenta em ambas as regiões. Assim, a utilização de valores para amplitude superiores a 1 V_{rms},

poderia trazer resultados mais consideráveis para as medições das amostras dos grupos um e dois.

A seguir, foram realizadas novas medições em ambas as regiões da amostra piloto, desta vez fixando o valor da amplitude em 1 Vrms, e usando-se valores de frequência de 0,5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz. A figura 28 mostra os resultados destas medições, onde as curvas em vermelho representam as medições feitas na parte usinada da amostra, enquanto as curvas em preto representam as medições feitas na sua parte bruta.

Figura 28 - Medições de ruído Barkhausen com variação da frequência

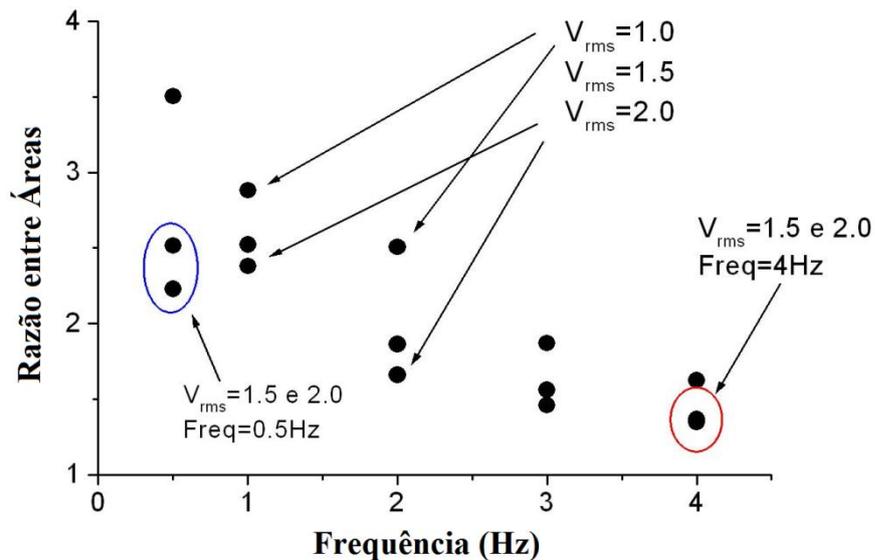


Fonte: Autor

Como já era esperado, observou-se que as medições realizadas na parte usinada da amostra piloto novamente apresentaram valores de ruído baixos quando comparados aos obtidos na parte não usinada, para todos os valores de frequência utilizados. Contudo, observa-se que com o aumento do valor da frequência, a diferença entre o ruído Barkhausen obtido na parte usinada e o obtido na parte não usinada tende a diminuir. A partir destes resultados, mesmo analisados apenas de forma qualitativa, entende-se que quando se aumentam os parâmetros de amplitude e principalmente de frequência, a diferença entre os níveis de ruído das duas regiões tende a diminuir.

A figura 29 mostra ainda que, à medida que os valores de amplitude e frequência são aumentados simultaneamente, a razão entre as áreas abaixo da curva para ambas as regiões aproxima-se de um, ou seja, à medida que estes valores aumentam, as áreas parecem convergir para um mesmo valor.

Figura 29 - Razão de áreas das regiões bruta e usinada

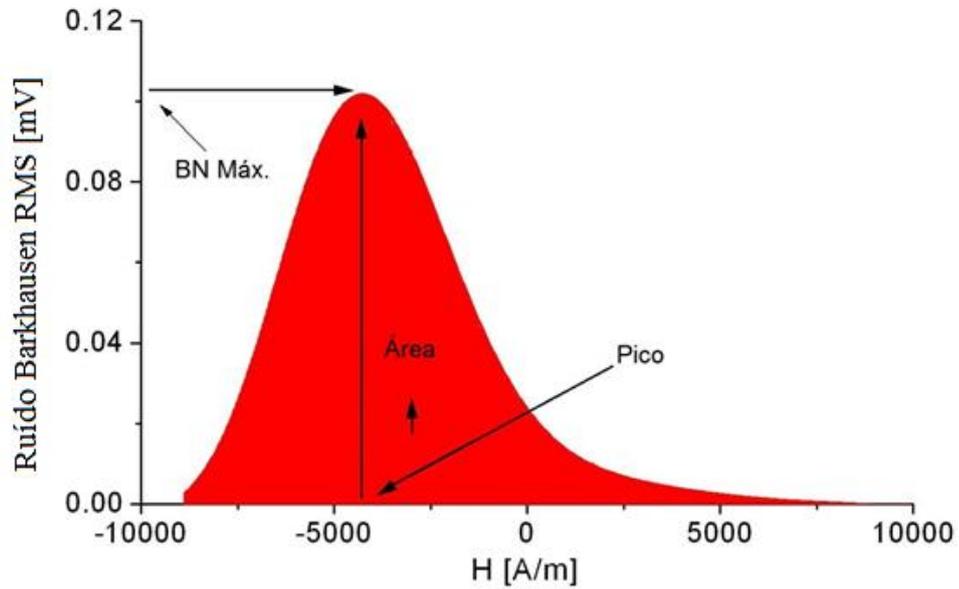


Fonte: Autor

Nestas condições, adotou-se como parâmetros de frequência e amplitude para as medições das dez amostras os valores de 4 Hz e 2 V_{rms} respectivamente. Para cada um dos 192 pontos em que foram realizadas medições do ruído em cada amostra, foram obtidos resultados numéricos, com os quais foram gerados gráficos através da utilização do programa *IBM SPSS Statistics* versão 21. Os gráficos gerados para cada ponto trazem três informações importantes sobre o ruído Barkhausen do ponto analisado. As primeiras informações trazidas pelo gráfico são a área abaixo da curva e o valor máximo do ruído Barkhausen, que estão ligados diretamente à energia do sinal ou ruído emitido pelo material naquele ponto. Quanto maior a área abaixo da curva e o ruído Barkhausen máximo, maior a energia do sinal naquele ponto. A outra informação mostrada pelo gráfico é a posição H do pico máximo do ruído Barkhausen. Esta informação está relacionada às características magnéticas e ao formato da curva de histerese do material.

A figura 30 mostra um exemplo de gráfico gerado a partir dos resultados obtidos nas medições feitas em um ponto de uma das amostras, onde estão destacadas as três informações descritas anteriormente.

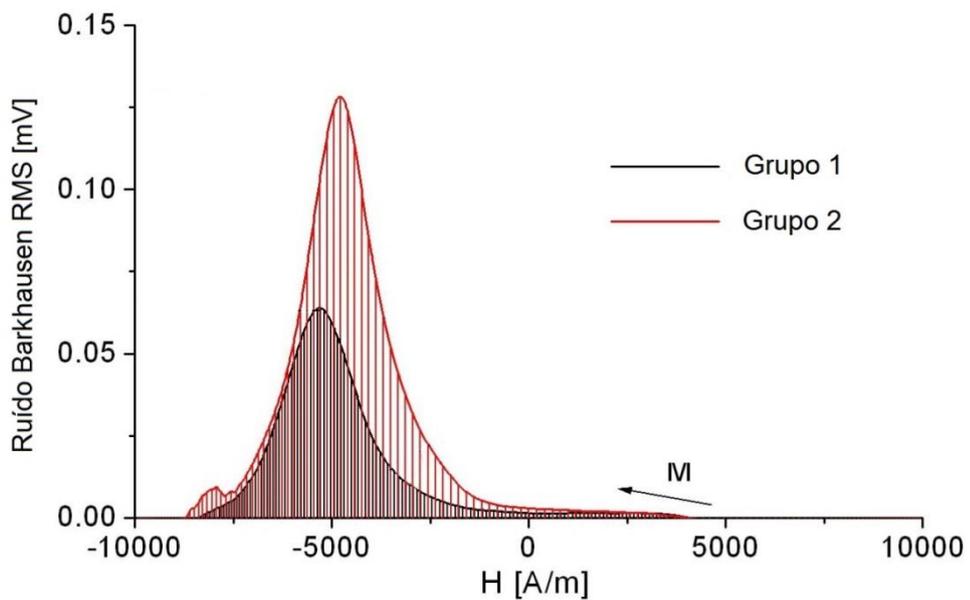
Figura 30 - Exemplo de gráfico do ruído Barkhausen



Fonte: Autor

Após concluir as medições nas cinco amostras do primeiro grupo, iniciaram-se as medições nas amostras do segundo grupo. A figura 31 mostra duas curvas sobrepostas, cada uma delas referente a um ponto qualquer de uma amostra de cada grupo. É possível visualizar a diferença de escala do ruído obtido em cada um dos grupos.

Figura 31 - Diferença do ruído Barkhausen entre os grupos de amostra



Fonte: Autor

Uma vez que as amostras do segundo grupo foram submetidas ao tratamento térmico de alívio de tensões, as mesmas apresentaram uma camada de oxidação superficial. De acordo com o que havia sido identificado nas medições da amostra piloto em relação à interferência do acabamento superficial sobre o ruído Barkhausen, a oxidação superficial apresentada pelas amostras do segundo grupo pode ter afetado o resultado. Por este motivo, não é possível afirmar quanto desta diferença de intensidade do ruído Barkhausen evidenciada entre ambos os grupos se deve à oxidação superficial e quanto se deve as mudanças nas tensões residuais presentes no material destas amostras causadas pelo alívio de tensões.

A figura 32 mostra uma seção de material de uma amostra do grupo um, à esquerda, ao lado de uma seção de material de uma amostra do grupo dois, à direita. É possível visualizar a diferença de acabamento superficial de ambos os grupos. Essas seções de material correspondem à sobre de material de cada amostra após a retiradas dos cinco anéis.

Figura 32 - Diferença de acabamento superficial entre os grupos de amostras



Fonte: Autor

Foi realizado ainda um ensaio metalográfico em uma das amostras do grupo dois, com o intuito de verificar se o tratamento de alívio de tensões ocasionou descarbonetação de sua superfície. A figura 33 mostra o resultado do ensaio metalográfico.

Figura 33 - Análise metalográfica de uma amostra do grupo dois



Fonte: Autor

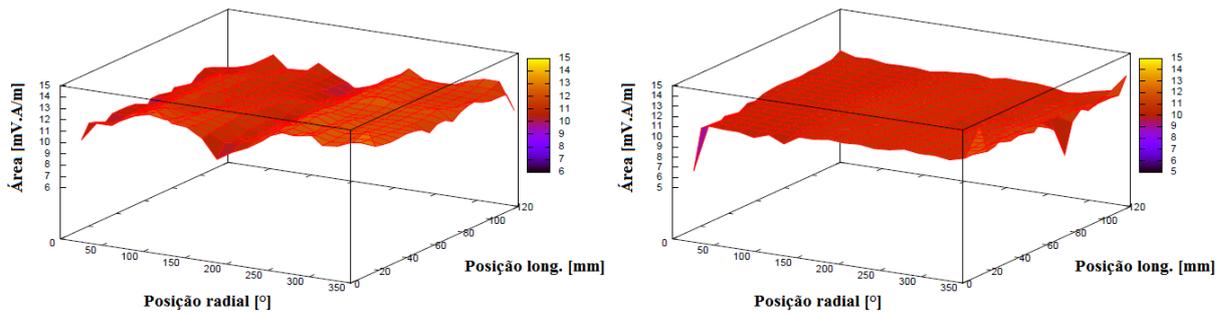
A metalografia indica que a amostra analisada não apresentou descarbonetação na superfície externa, e que a mesma sofreu apenas oxidação de sua superfície, oxidação esta causada devido ao tratamento térmico de alívio de tensões ter sido realizado em forno que não possuía atmosfera controlada, o que poderia ter evitado esta oxidação. Embora não seja possível afirmar quanto da diferença nos valores do ruído Barkhausen encontrada entre os grupos seja causada pela diferença de acabamento superficial entre eles, conforme mencionado anteriormente, acredita-se que essa diferença de ruído seja causada em sua totalidade ou em grande parte pelas mudanças causadas pelo tratamento térmico nas tensões residuais presentes no material. Isso porque não se espera que a camada de oxidação gerada pelo tratamento seja suficientemente significativa para criar uma blindagem magnética na superfície das amostras ou mesmo alterar as características magnéticas das mesmas. De qualquer maneira, essa camada de oxidação se apresenta de forma homogênea ao longo da superfície das amostras, portanto sua influência sobre o ruído Barkhausen deve ser constante ao longo da mesma.

Além dos valores do ruído Barkhausen, foi analisada também a homogeneidade das amostras, em relação à variação dos valores de ruído medidos ao longo de sua superfície. O fato de uma amostra apresentar variações na intensidade do ruído Barkhausen ao longo de sua superfície poderia ser um indicativo de tensões residuais localizadas ou de tensões com magnitudes diferentes. Esta condição poderia causar a deformação dos anéis trava após a execução do corte longitudinal, considerando que o corte abalaria a condição de equilíbrio destas tensões, que tenderiam a se reequilibrar.

Esta homogeneidade pode ser visualizada através dos mapas gerados com os resultados das medições em cada ponto, que representam a superfície planificada de cada

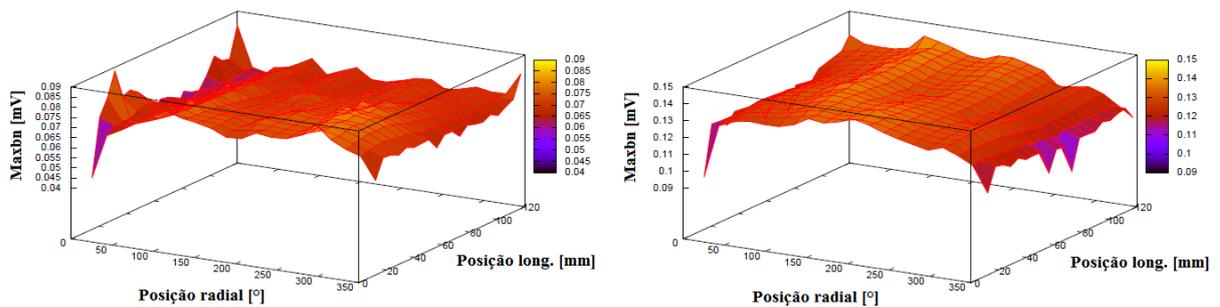
amostra. As figuras 34 a 36 apresentam os mapas gerados para uma amostra do primeiro grupo e uma do segundo a partir dos valores de cada ponto da área abaixo da curva, do valor RMS máximo do ruído Barkhausen, denominado Maxbn, e da posição H deste pico, respectivamente.

Figura 34 - Mapa da Área abaixo da curva – amostra 01 x 08



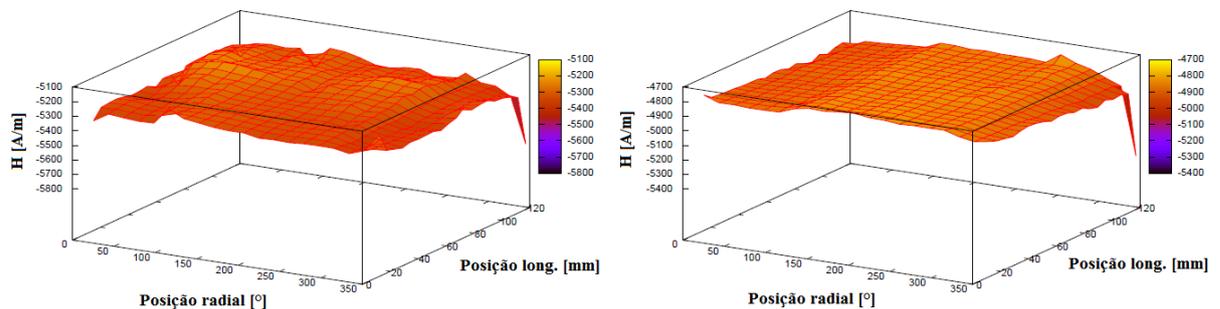
Fonte: Autor

Figura 35 - Mapa do Maxbn – amostra 01 x 08



Fonte: Autor

Figura 36 - Mapa de H - amostra 01 x 08

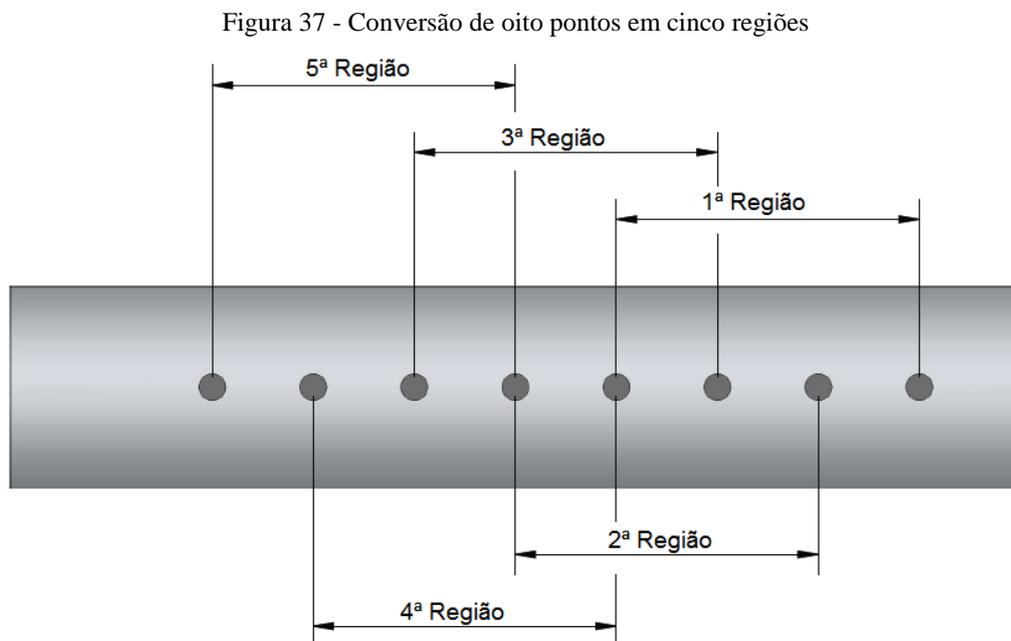


Fonte: Autor

É possível observar que a amostra 01 não se mostrou homogênea ao longo de sua superfície, principalmente em relação aos valores de área abaixo da curva e de ruído Barkhausen RMS máximo, que mostraram variações especialmente ao longo da posição radial da superfície da amostra. Este comportamento se repetiu para as demais amostras do grupo

um. Já nos mapas da amostra 08 observa-se um comportamento diferente, com bons níveis de homogeneidade, especialmente nos valores da área abaixo da curva, que se mostraram lineares ao longo das posições radiais e longitudinais. A amostra 08 apresentou, porém, pequenas variações dos valores de ruído Barkhausen RMS máximo ao longo das posições radiais, variações estas que se acredita terem sido causadas por algum fator inerente ao ensaio, uma vez que não se observou o mesmo comportamento nos valores de área e de H.

Conforme descrito anteriormente e mostrado na figura 12, as medições de ruído Barkhausen foram dispostas ao longo do comprimento das amostras em oito pontos distantes 15 milímetros entre si. Devido a isso, foi feita uma média de cada quatro pontos de medição ao longo do comprimento, para que resultasse em cinco regiões de medição, equivalentes aos cinco anéis obtidos de cada amostra, conforme ilustrado na figura 21. A primeira região, por exemplo, que se refere ao primeiro anel trava, resultou da média dos pontos um a quatro, enquanto a segunda região compreendeu os pontos dois a cinco. Essa conversão se fez necessária para que os dados referentes às medições dimensionais de cada anel trava pudessem ser relacionados com apenas uma linha de valores referentes às medições do ruído Barkhausen. A figura 37 mostra como essa conversão de oito pontos em cinco regiões foi feita.



Fonte: Autor

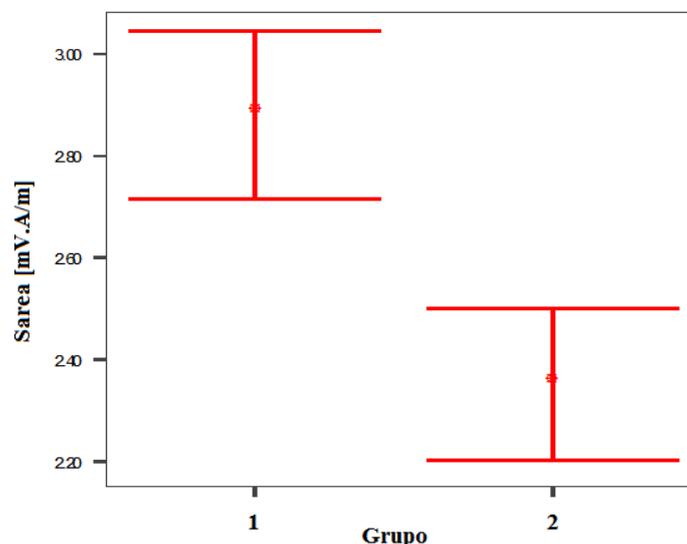
Os resultados obtidos após a separação das amostras dos grupos um e dois em cinco regiões, ou em cinco peças, estão apresentados no Apêndice A. As colunas Área, Maxbn e H

representam a média dos valores da área abaixo da curva, a média dos valores do máximo ruído Barkhausen RMS e a média dos valores da posição do pico máximo dos 96 pontos radiais e longitudinais referentes a cada região, respectivamente. As colunas Sarea, Smaxbn e Sh por sua vez representam os desvios padrão encontrados para os valores da Área, do Maxbn e do H dentre os 96 pontos radiais e longitudinais pertencentes a cada região, respectivamente.

É possível identificar que os valores de Maxbn e de H se apresentam agrupados de formas distintas em cada grupo, porém a Área não faz uma distinção tão clara. Além disso, os valores de Sarea são menores para algumas amostras do grupo dois, em relação às amostras do grupo um. Já os valores de Sh se apresentam inferiores em praticamente todas as peças do grupo dois, em relação às do grupo um. Essa diferença de Sarea e de Sh indica que as amostras do grupo dois apresentam níveis de homogeneidade melhores que as do grupo um, o que sugere que o tratamento térmico, além de aliviar ou reduzir o valor das possíveis tensões presentes nas amostras, também promove uma homogeneização das tensões ao longo das mesmas. Mesmo não sendo possível evidenciar através do ruído Barkhausen a diminuição do valor das tensões residuais presentes nos tubos que passaram pelo tratamento, esta diferença de Sarea e Sh acaba evidenciando sua eficácia.

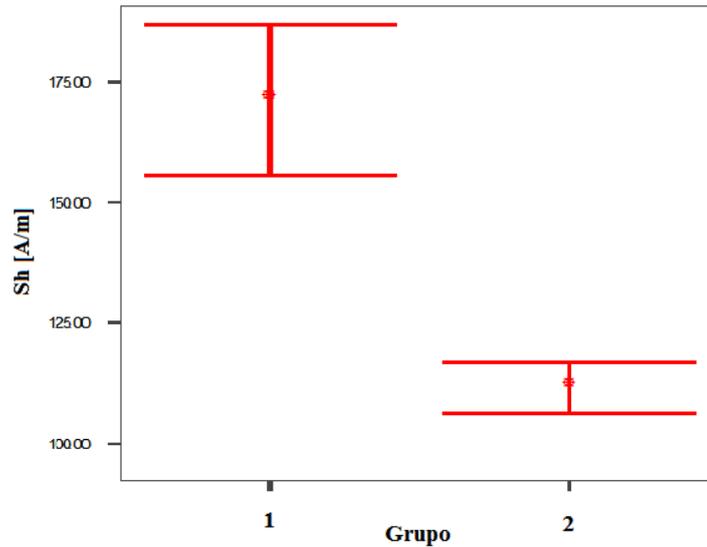
As figuras 38 e 39 mostram o agrupamento dos valores de Sarea e Sh, respectivamente, para cada grupo através de gráficos do tipo *Barra de Erro* gerados com a utilização do programa *IBM SPSS Statistics* versão 21. As barras foram geradas considerando 90% dos valores mais próximos ao valor médio de cada grupo.

Figura 38 - Sarea para cada grupo



Fonte: Autor

Figura 39 - Sh para cada grupo



Fonte: Autor

As amostras foram então submetidas às próximas etapas de usinagem, onde de cada amostra foram produzidos cinco anéis, como o mostrado anteriormente nas figuras 21 e 23. Depois de concluídas estas etapas, foram realizadas medições do diâmetro externo dos anéis trava. O Apêndice B traz os resultados das medições de diâmetro externos dos anéis provenientes das amostras dos grupos um e dois. A medição de cada anel foi feita em três posições, defasadas em aproximadamente 120°. A coluna Medb apresenta a média das três medições de cada anel, enquanto a coluna Varb apresenta a variação máxima encontrada em cada anel e as colunas Minb, Intb e Maxb apresentam as medidas mínima, intermediária e máxima encontradas em cada peça.

Os anéis passaram então pela última etapa de usinagem, onde foi executado o corte longitudinal mostrado anteriormente nas figuras 22 e 24. Depois de concluída esta etapa de usinagem, foram realizadas novas medições do diâmetro externo dos anéis trava, além da medição do corte longitudinal. O Apêndice C traz os resultados das medições dos anéis provenientes das amostras dos grupos um e dois. Novamente a medição do diâmetro de cada anel foi feita em três posições, defasadas em aproximadamente 120°. A coluna Meda apresenta a média das três medições de cada anel, enquanto a coluna Vara apresenta a variação máxima encontrada em cada anel, as colunas Mina, Inta e Maxa apresentam as medidas mínima, intermediária e máxima encontradas em cada peça, a coluna Posição indica a posição angular onde o corte foi executado e a coluna Corte traz a medida da largura do corte.

A partir destes resultados, é possível observar que não há um padrão de deformação definido entre as peças do grupo um e as do grupo dois. Algumas peças do grupo um aumentaram de diâmetro após o corte, enquanto outras peças do mesmo grupo apresentaram diminuição desta medida. Dentre as peças pertencentes ao grupo dois também se observa o mesmo comportamento. Em relação à circularidade das peças também não se observa um padrão dentro de cada grupo, pois existem peças em ambos os grupos com variações próximas a 0,10 milímetros, enquanto outras chegaram a valores próximos a 0,50 milímetros. É possível observar ainda peças provenientes de uma mesma amostra com valores de variação muito diferentes.

A tabela 5 traz a relação dos anéis que seriam considerados aprovados de acordo com os critérios dimensionais do desenho técnico. As demais peças que não aparecem na tabela 5 seriam consideradas reprovadas.

Tabela 5 - Anéis aprovados de acordo com o desenho

Amostra	Peça	Mina [mm]	Inta [mm]	Maxa [mm]	Meda [mm]	Vara [mm]
1	5	133,66	133,74	133,86	133,75	0,20
3	3	133,70	133,76	133,84	133,77	0,14
4	4	133,72	133,84	133,86	133,81	0,14
7	1	134,00	134,07	134,10	134,06	0,10
	4	133,96	134,01	134,10	134,02	0,14
	5	133,84	133,96	134,00	133,93	0,16
9	1	133,82	133,86	133,96	133,88	0,14
10	5	133,82	133,86	134,02	133,90	0,20

Fonte: Autor

Considerando a variação dimensional sofrida pela grande maioria das peças de ambos os grupos, é possível afirmar que o tratamento térmico de alívio de tensões aplicado no material antes da usinagem das peças não se fez efetivo para evitar que as peças sofressem deformações no momento que fossem cortadas. Isto indica que outros fatores além das tensões residuais presentes no material influenciam a deformação das peças no momento do corte, dentre os quais se pode destacar as possíveis tensões residuais induzidas nas peças pelos processos de usinagem que antecedem o corte, além dos esforços sofridos pelas peças durante a própria operação de corte. Entretanto, vale salientar que das oito peças que foram consideradas aprovadas, cinco foram fabricadas a partir de amostras do grupo dois, o que indica que mesmo não tendo sido completamente eficaz, o alívio de tensões contribuiu na estabilidade do processo.

Após a conclusão das medições, algumas análises exploratórias foram realizadas, com o intuito de identificar possíveis correlações entre os valores obtidos nas medições do ruído Barkhausen e os resultados obtidos nas medições dimensionais das peças. Nestas análises a medida do corte longitudinal das peças foi desprezada, visto que este corte é realizado de forma manual, e a sua medida final depende, além da deformação da peça após o corte, do acerto da medida no momento de sua execução por parte do operador. Para realização destas análises, os grupos um e dois foram analisados separadamente. O programa SPSS calcula para cada duas variáveis o coeficiente linear de Pearson, que segundo Lira (2004) é um dos métodos mais usuais para medição de correlações lineares entre duas variáveis. Este coeficiente é obtido através da equação 4, onde $COV_{X,Y}$ é a covariância das duas variáveis, S_X e S_Y correspondem aos desvios padrão das variáveis X e Y respectivamente.

$$\hat{\rho} = \frac{COV_{X,Y}}{S_X S_Y} \quad (4)$$

A covariância é obtida da equação 5, onde E é a esperança matemática, X é uma das variáveis distribuídas, μ_x é a média da variável X, Y é a outra variável distribuída e μ_y é a média da variável Y (LIRA, 2004).

$$COV_{X,Y} = E[(X - \mu_x)(Y - \mu_y)] \quad (5)$$

Segundo Lira (2004), os níveis de correlação estão relacionados ao coeficiente de Pearson da seguinte maneira:

- a) Se $0 < \hat{\rho} < 0,30$, existe correlação fraca;
- b) Se $0,30 \leq \hat{\rho} < 0,60$, existe correlação moderada;
- c) Se $0,60 \leq \hat{\rho} < 0,90$, existe correlação forte;
- d) Se $0,90 \leq \hat{\rho} < 1$, existe correlação muito forte.

A tabela 6 traz as correlações dos valores obtidos para o grupo um, onde a Correlação é o valor do coeficiente Linear de Pearson, a Significância representa o percentual de erro da correlação e N indica o número de amostras consideradas no cálculo.

Tabela 6 - Correlações do grupo um

		Área	Maxbn	H	Sarea	Smaxbn	Sh
Meda	Correlação	-0,105	0,468	0,28	0,091	0,51	0,203
	Significância	0,619	0,018	0,176	0,666	0,009	0,33
	N	25	25	25	25	25	25
Vara	Correlação	0,212	-0,263	-0,11	-0,057	-0,036	-0,099
	Significância	0,309	0,205	0,602	0,787	0,863	0,638
	N	25	25	25	25	25	25

Fonte: Autor

É possível observar que existem correlações moderadas entre Meda e Maxbn e entre Meda e Smaxbn, porém existem apenas correlações fracas com Vara. Meda e Vara precisam ser avaliados em conjunto para considerar uma peça como aprovada ou reprovada, uma vez que qualquer um deles isoladamente é capaz de reprovar uma peça, porém somente os dois em conjunto são capazes de aprová-la. Uma peça com Meda fora do especificado, está reprovada, assim como uma peça com Vara fora do especificado também está reprovada, porém para ser aprovada, ambos os valores precisam estar dentro do especificado pelo desenho do anel trava.

A tabela 6 traz as correlações dos valores obtidos para o grupo dois.

Tabela 7 - Correlações do grupo dois

		Área	Maxbn	H	Sarea	Smaxbn	Sh
Meda	Correlação	0,625	0,334	0,382	0,259	-0,348	-0,077
	Significância	0,001	0,103	0,059	0,21	0,088	0,716
	N	25	25	25	25	25	25
Vara	Correlação	0,061	-0,31	-0,3	-0,194	-0,193	-0,14
	Significância	0,771	0,131	0,145	0,353	0,356	0,503
	N	25	25	25	25	25	25

Fonte: Autor

Neste grupo, observam correlações moderadas entre Meda e Maxbn, Meda e H, Meda e Smaxbn, Vara e Maxbn e Vara e H. É possível observar ainda uma correlação forte entre Meda e Área. Os resultados das correlações obtidos para ambos os grupos mostram que existem mais relações entre o ruído Barkhausen e a medida final média das peças do que com a ovalização apresentada pelas mesmas após o corte.

Por fim, buscou-se um modelo linear que tornasse possível determinar a medida média Meda das peças através dos valores de ruído Barkhausen medidos antes da usinagem. O modelo linear é obtido através do programa *IBM SPSS Statistics* versão 21, e para as amostras do grupo um, os parâmetros selecionados para este modelo foram Maxbn e Smaxbn,

peças fosse possível.

Para o grupo dois, os parâmetros selecionados para o modelo linear foram Área e H, que apresentaram melhores níveis de correlação com Meda. A equação 7 determina Meda em função de Área e H, onde Constante1, B_3 e B_4 são valores dados pelo programa SPSS, os quais estão mostrados na tabela 8.

$$\text{Meda} = \text{Constante1} + B_3 \times \text{Área} + B_4 \times H \quad (7)$$

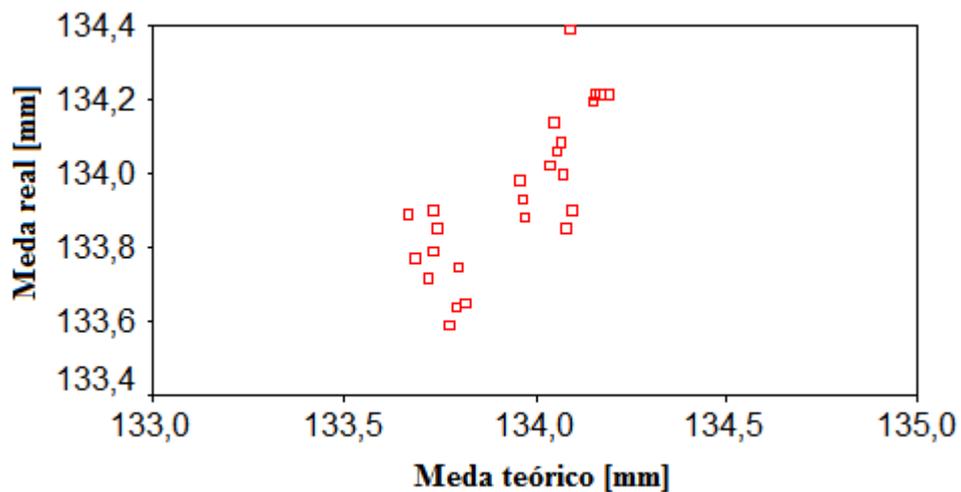
Tabela 9 - Modelo linear do grupo dois

Parâmetro	Valor
Constante1	138,460
B_3	0,135
B_4	$1,264 \times 10^{-3}$

Fonte: Autor

A figura 41 mostra os valores de Meda reais, obtidos das medições realizadas nas peças, em relação aos valores de Meda teóricos, obtidos através da equação 7, para as peças do grupo dois.

Figura 41 - Meda real x Meda teórico - grupo dois



Fonte: Autor

Observa-se que o gráfico das peças do grupo dois possui uma tendência linear menos fraca que o gráfico das peças do grupo um. Isto se deve aos melhores níveis de homogeneidade apresentados pelas peças deste grupo.

5 CONCLUSÕES

Baseado nos resultados das medições das dimensões das peças após a operação de corte é possível identificar que não há uma diferença considerável na quantidade de peças aprovadas entre as amostras que passaram pelo tratamento de alívio de tensões em relação às aquelas que não passaram por este tratamento. Com isso é possível afirmar que, mesmo que as tensões residuais presentes nos tubos utilizados para fabricação das peças contribuam para a deformação das mesmas após o corte, outros fatores contribuem de forma mais direta para esta deformação. É possível ainda afirmar que, dentre estes demais fatores, o que se mostra mais impactante para estas deformações são as tensões residuais induzidas nas peças pelas etapas de usinagem, uma vez que com o processo utilizado atualmente pela empresa, onde as peças são submetidas ao alívio de tensões antes da operação de corte, quando as demais etapas de usinagem já estão concluídas, a quantidade de peças aprovadas no fim do processo se mostra bem superior aos valores obtidos neste estudo. Conclui-se, portanto, que o alívio das tensões residuais presentes apenas nos materiais, antes dos processos de usinagem, não é eficaz para garantir a aprovação das peças após a fabricação.

Com relação aos resultados obtidos nas medições de ruído Barkhausen, observa-se que ele apresenta valores bem distintos para as amostras que passaram pelo alívio de tensões e para aquelas que não passaram pelo tratamento. Verificou-se também que o acabamento superficial das peças influencia os resultados do ruído Barkhausen, porém acredita-se que as diferenças nos valores de ruído observadas entre as amostras com e sem alívio de tensões sejam causadas em grande parte pelas mudanças causadas pelo tratamento no material. Além disso, considera-se que a camada de oxidação superficial gerada pelo tratamento seja homogênea ao longo da superfície das amostras, e que a mesma não tenha influência sobre os menores desvios padrões observados para as amostras com tratamento e, portanto, sobre as correlações identificadas.

Após o cruzamento dos resultados das medições dimensionais das peças com as medições do ruído Barkhausen, observou-se que o ruído se relaciona de forma muito satisfatória com a homogeneização das peças causada pelo alívio de tensões, vindo a apresentar valores inferiores de variação nos seus resultados ao longo da superfície das amostras que foram submetidas ao tratamento. Isto se refletiu também nas correlações feitas entre os valores de ruído Barkhausen e os resultados dimensionais das peças, onde as peças com tratamento apresentaram tendências lineares melhores do que as peças sem tratamento. Foi possível concluir também que o ruído Barkhausen se relacionou de forma satisfatória com

a dimensão média final das peças, sendo capaz de prever essa dimensão com boa assertividade, principalmente nas peças com alívio de tensões. Esta relação não se repetiu, porém, com os valores de variação da dimensão final das peças mesmo nas peças com tratamento.

De forma geral, considera-se que as correlações identificadas entre os valores obtidos nas medições do ruído Barkhausen e os valores obtidos nas medições dimensionais das peças são promissores, pois foi possível observar tendências lineares nestas correlações, ainda que moderadas, mesmo utilizando apenas 25 peças em cada um dos grupos. Contudo, após a realização deste trabalho, devido ao baixo número de peças aprovadas, não foi possível determinar quaisquer parâmetros que indicassem a real necessidade da realização do alívio de tensões.

Alguns estudos futuros poderiam ser sugeridos para a obtenção de resultados que seriam capazes de complementar e aperfeiçoar os que foram obtidos neste trabalho. Algumas das principais sugestões de estudos estão listadas abaixo:

- a) utilização de amostragens maiores para melhorar a confiabilidade dos resultados estatísticos, onde poderiam ser utilizados também diferentes lotes de material para verificação da repetibilidade dos resultados;
- b) utilização de um forno com atmosfera controlada, ou de um processo a vácuo para a realização do alívio de tensões para eliminar a influência do acabamento superficial nos resultados do ruído Barkhausen;
- c) inclusão de um terceiro grupo de amostras, que seria submetido ao alívio de tensões antes da operação de corte, com as demais etapas de usinagem concluídas, conforme processo de fabricação atualmente utilizado pela empresa. Isso melhoraria os resultados estatísticos, mediante a obtenção de um maior número de peças aprovadas;
- d) análise mais aprofundada das tensões induzidas pelos processos de usinagem e suas correlações com a deformação das peças.

BIBLIOGRAFIA

BAIOTTO, R. O ruído Barkhausen como ferramenta não destrutiva para análise do processo de fadiga do aço AISI 4340. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2011.

BERTOTTI, G. Hysteresis in Magnetism: For Physicists, Materials Scientists, and Engineers. Chestnut Hill: Gulf Professional Publishing, 1998

BHADESHIA, H.K.D.H. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steels. EUA: ASM International, p. 3-10, 2002.

BOHN, F. Magnetostricção e ruído Barkhausen em aços elétricos de grão não-orientado. Santa Maria: Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal de Santa Maria, 2005.

BOHN, F. Propriedades estatísticas do ruído Barkhausen em materiais magnéticos artificialmente estruturados. Santa Maria: Tese (Doutorado em Física) – Universidade Federal de Santa Maria, 2009

CEGLIAS, R. B. Análise de tensão residual em tubo de aço API 5L X70. Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado pelo Instituto Militar de Engenharia, 2012.

CHIAVERINI, V. Tratamento Térmico das Ligas Metálicas. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2003.

CULLITY, B. D, GRAHAM, C. D. Introduction to Magnetic Materials. 2ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.

DEVAUX, S.; DUQUENNOY, M.; GUALANDRI, J.; OUAFTOUH, M.; OURAK, M. Evaluation of residual stress profiles using the Barkhausen noise effect to verify high performance aerospace bearings. França: Taylor & Francis, 2004.

DURIN, G.; ZAPPERI, S. The Barkhausen effect. Amsterdam: The Science of Hysteresis, 2004.

GRIFTHS, D. J. **Eletrodinâmica**. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2011.

GRANT, P. V.; LORD, J. D; WHITEHEAD, P.S. **The Measurement of Residual Stress by the Incremental Hole Drilling Thechnique**. Middlesex: National Physical Laboratory, 2002.

GUIMARÃES, A. P. **Magnetismo e Ressonância Magnética em Sólidos**, São Paulo: Edusp, 2009.

HIRSCH, T.; MACHADO, R.; CAMPOS, M. F.. **Tensões Residuais em Aços Avaliados por Difração de Raios-X: Diferença Entre Micro e Macro Tensões Residual**. São Paulo: III Workshop sobre textura, p. 115-131, 2006.

JILES, D. **Introduction to Magnetism and Magnetic Materials**. London: Chapman & Hall, 1991.

LIRA, S. A. **Análise de Correlação: Abordagem Teórica e de Construção dos Coeficientes com aplicações**. 2004. Dissertação (Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

LU, J. **Handbook of Measurements of Residual Stress**, Vol. 2, 2ed. EUA: SEM, p. 12 e 417, 2005

NUNES, R. M. **Análise de tensões residuais no processo de trefilação combinada do aço AISI 1048 visando minimizar distorções pós processamento**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

REPPER, J.; HOFMANN, M.; KREMPASZKY, C.; REGENER, B.; BERHUBER, E.; PETRY, W.; WERNER, E. **Effect of macroscopic relaxation on residual stress analysis by diffraction methods**. Germany: Journal of Applied Physics, 2012.

RUUD, C. **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steels**. EUA: ASM International, p. 141-149, 2002.

SANTA-AHO, S.; SORSA, A.; HAKANEN, M.; LEIVISKÄ, K.; VIPPOLA, M.; LEPISTÖ, T. **Barkhausen noise-magnetizing voltage sweep measurement in evaluation of residual stress in hardened components**. Finlandia: Meas. Sci. Technol.-IOPscience, 2014

SOARES, M. C. **Influência das Tensões Residuais no Comportamento em Fadiga e Fratura de Ligas Metálicas**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 1998.

STUPAKOV, O.; PEREVERTOV, O.; TOMÁS, I.; SKRBK; B. **Evaluation of surface decarburization depth by magnetic Barkhausen noise technique**. República Tcheca: Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2011.

TEBEDGE, N.; ALPSTEN G.; TALL L. **Residual-stress Measurement by the Sectioning Method**. Cleveland: SESA Spring Meeting held, 1972.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência: PETROBRAS, 2001.

WANG, Z.; GONG, B. **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steels**. EUA: ASM International, p. 141-149, 2002.

ŽEROVNIK, P., GRUM, J. **Determination of Residual Stresses from the Barkhausen Noise Voltage Signal**. Ljubljana: The 10th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing. 2009.

ANEXO A

CERTIFICADO DA MATÉRIA PRIMA DAS AMOSTRAS

HUBEI XIN YEGANG SPECIAL TUBES CO., LTD.
 NO.316,HUANGSHI AVENUE, HUANGSHI,HUBEI,CHINA
QUALITY CERTIFICATE



CONTRACT NO.:TR2026
 DESCRIPTION OF GOODS: HOT ROLLED SEAMLESS STEEL TUBES
 FREE FROM MERCURY CONTAMINATION,NO WELD REPAIR, LATEST EDITION(FOR ASTM 519)
 P.O.NO.:CX14114712 PART NO.1990000434 SPECIFICATION:W9412

Grade		Batch No.		Heat No.		Size		Pieces		Diameters		Weight (MT)		Length(FT)		Condition of Delivery																		
4140 10KSI		581202805		29KA5088		141.3X27.5 mm		24		4		10.156		Q + T																				
Chem. Analysis / Chemical Composition (Wt %)																																		
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	W	V	Mo	Al	Ti	Bi	B	Nb	As	Sn	Sb	Pb	Ca	DI	CEV	N	[O]	[H]							
Min		0.38	0.75	0.15			0.80					0.15																						
Max		0.43	1.00	0.35	0.025	0.020	1.10	0.25	0.30			0.03	0.25	0.035					0.10															
Ladle		0.40	0.94	0.26	0.010	0.002	0.94	0.01	0.03			0.006	0.22	0.031	0.0065				0.0016															
Product 1		0.40	0.92	0.25	0.009	0.002	0.93	0.01	0.03			<0.01	0.22	0.032	0.007				0.0020															
Product 2		0.40	0.93	0.26	0.009	0.002	0.93	0.01	0.03			0.006	0.22	0.032	0.007				0.0020															
Acid Macroscopic Structure (Level)																																		
Segregation		General Porosity		Center Porosity		Non-metallic inclusion (Level)													Microstructure		Decarburizing Layer		Jointing Test (HRC)		As-quenched hardness		Defect result		Dimensional inspection		Visual examination			
Mechanical Properties																																		
Yield Strength (KSI)		Tensile Strength (KSI)		Elongation A (%)		Reduction Area (%)		Quadrant hardness		Surface Hardness (HRC)		Surface Hardness (HBW)		4T		Lateral Expansion (mm)		Shear Expansion (mm)		Lateral Expansion (mm)		Shear (%)		Reduction Ratio										
128.035		143.115		20.0		63		302-307		108		110		110		72																		
Mechanical Properties Inspection																																		
Standard		Location		Direction		Depth of specimens		Gauge Length		Tensile Diameter		notch depth		external interrefraction		internal interrefraction		conclusion		standard		conclusion		testing level		standard		conclusion		testing level		conclusion		
ASTM A370		Tube end		Longitudinal for tensile		1/2T		4D		0.3"		ASTM E213		1.2(3%)S		OK		OK		ASTM E709		CX-430		OK		OK		OK		OK				
Austenitization																																		
Temperature		Time		Cooling Media		Temperature of Quench Media		Tempering		Cooling Method after tempering		Furnace heat treatment		Stress Relieve		Quality System																		
817C		60min		Water-Cooled		18C		22C		173min		20.2-28		Yes		Stamp for Traceability																		
Note:																																		
(1) We hereby certify that the material herein described has been manufactured, sampled, tested and inspected in accordance with the requirements of specifications and purchase order, and met the requirements																																		
(2) When there is any complaint, you are kindly requested to mark the Steel Grade, Heat No., Size, Delivery Date, Causes and reserve the material in the condition of delivery																																		
(3) A1: 2-A11.2; Manufacturing engineering: BAP4L-F-VDRH+CC																																		



ANEXO B

CERTIFICADO DO ALÍVIO DE TENSÕES

CERTIFICADO DE QUALIDADE

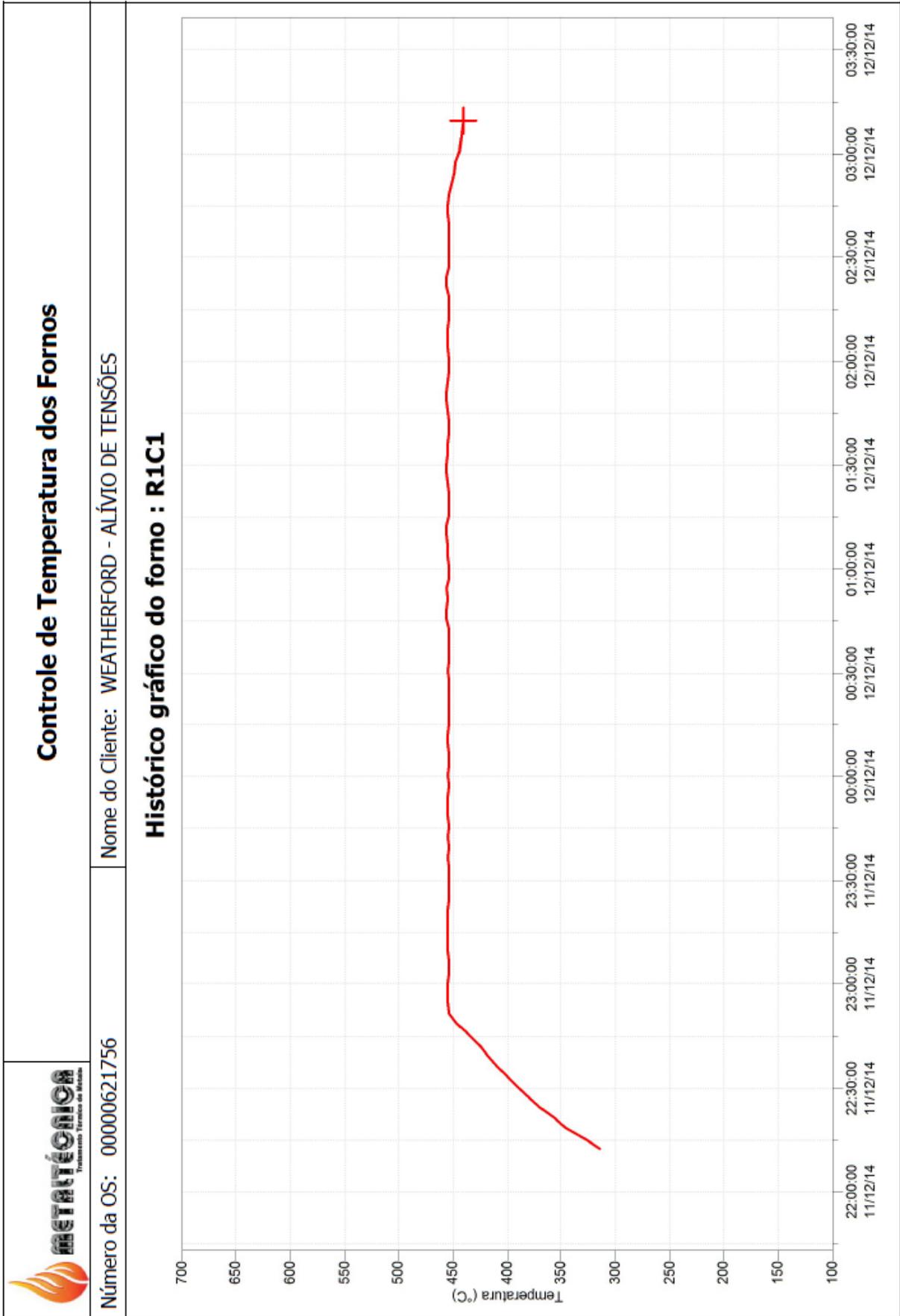
Número do Certificado: 385891	Data: 12/12/2014
NF de Entrada: 23411	Nome da Peça: COBAIA DO ANEL
NF de Saída: 139596	Material: SAE 4140
Nº OS: 621756	Quantidade: 5,00 PC
Cliente: WEATHERFORD IND. COM. LTDA.	

Especificações	
Tratamento Térmico: ALÍVIO DE TENSÕES	
Dureza Solicitada:	Dureza Verificada:
Camada Solicitada:	Camada Verificada:

Observações
Referência da Peça: 5090005823 Tamanho do Grão:
OP: 65535 RIMP: 007/13 CÓDIGO WINDCHILL: 160738 TRATAMENTO CFE WH-141.

Imagens

BIANCA REGINATO
Dept. de Controle de Qualidade
CECÍLIA BIZOTTO



Fonte: Acervo Weatherford, 2015

APÊNDICE A

RESULTADO DAS MEDIÇÕES DO RUIÍDO BARKHAUSEN

(continua)

Amostra	Peça	Área [mV.A/m]	Maxbn [mV]	H [A/m]	Sarea [mV.A/m]	Smaxbn [mV]	Sh [A/m]
1	1	11,87	0,08	-5362,42	3,53	0,02	162,10
	2	11,76	0,08	-5309,84	3,17	0,02	210,34
	3	11,57	0,07	-5251,68	3,31	0,02	257,64
	4	11,06	0,07	-5232,28	3,28	0,02	246,50
	5	11,01	0,06	-5256,84	3,69	0,02	255,15
2	1	13,76	0,07	-5333,43	3,29	0,01	176,86
	2	13,67	0,07	-5284,36	3,28	0,02	191,30
	3	13,70	0,07	-5261,86	3,20	0,02	174,74
	4	13,45	0,06	-5286,92	3,12	0,02	189,73
	5	13,32	0,06	-5310,66	2,93	0,02	184,19
3	1	11,58	0,07	-5447,23	3,21	0,01	141,64
	2	11,91	0,06	-5417,43	3,17	0,02	165,21
	3	11,82	0,06	-5381,29	3,13	0,02	212,04
	4	12,04	0,06	-5377,46	3,11	0,01	217,23
	5	11,98	0,06	-5387,78	3,13	0,01	209,09
4	1	11,24	0,07	-5505,57	2,29	0,01	134,47
	2	11,38	0,07	-5481,37	2,38	0,01	131,88
	3	11,45	0,07	-5468,60	2,71	0,01	142,62
	4	11,76	0,07	-5472,98	2,47	0,01	150,37
	5	11,78	0,06	-5502,39	2,33	0,01	156,31
5	1	12,01	0,07	-5540,16	2,32	0,01	121,91
	2	11,99	0,07	-5536,00	2,44	0,01	118,62
	3	12,36	0,06	-5526,12	2,38	0,01	118,22
	4	12,54	0,06	-5527,28	2,12	0,01	122,10
	5	12,18	0,07	-5552,36	2,06	0,01	92,01
6	1	13,03	0,13	-4799,07	2,60	0,02	105,25
	2	13,25	0,13	-4809,21	2,36	0,02	103,43
	3	13,44	0,13	-4810,25	2,42	0,02	100,55
	4	13,32	0,13	-4822,25	2,39	0,02	107,04
	5	13,16	0,13	-4841,93	1,79	0,02	96,85
7	1	12,04	0,13	-4771,27	2,55	0,01	107,13
	2	12,09	0,13	-4774,80	2,56	0,02	108,46
	3	12,23	0,13	-4782,75	2,74	0,02	107,28
	4	12,15	0,14	-4797,04	2,79	0,02	115,25
	5	12,01	0,14	-4838,22	2,61	0,02	105,14
8	1	10,66	0,13	-4831,14	1,80	0,02	89,03
	2	10,73	0,13	-4839,14	1,66	0,02	84,35
	3	10,73	0,13	-4853,97	1,66	0,02	98,00
	4	10,63	0,13	-4859,57	1,80	0,02	107,36
	5	10,50	0,13	-4871,80	1,70	0,02	122,35

(conclusão)

Amostra	Peça	Área [mV.A/m]	Maxbn [mV]	H [A/m]	Sarea [mV.A/m]	Smaxbn [mV]	Sh [A/m]
9	1	13,60	0,10	-5013,84	2,25	0,02	151,46
	2	13,79	0,11	-5029,77	2,25	0,01	143,85
	3	14,13	0,11	-5004,03	2,17	0,01	138,98
	4	14,09	0,11	-4979,86	2,20	0,01	118,43
	5	14,04	0,11	-4980,20	2,16	0,01	115,99
10	1	11,42	0,10	-4987,17	3,09	0,02	120,21
	2	11,63	0,10	-5008,23	2,70	0,01	121,04
	3	11,97	0,10	-5015,22	2,93	0,01	115,64
	4	12,03	0,11	-5005,74	2,76	0,02	100,73
	5	11,91	0,11	-4996,30	2,85	0,01	104,51

APÊNDICE B

RESULTADO DAS MEDIÇÕES DE DIÂMETRO PRÉ CORTE

(continua)

Amostra	Peça	Minb [mm]	Intb [mm]	Maxb [mm]	Medb [mm]	Varb [mm]
1	1	133,97	133,97	133,97	133,97	0,00
	2	133,94	133,95	133,96	133,95	0,02
	3	133,94	133,95	133,97	133,95	0,03
	4	133,98	133,99	133,99	133,99	0,01
	5	133,96	133,98	133,98	133,97	0,02
2	1	133,96	134,00	134,03	134,00	0,07
	2	133,97	134,00	134,02	134,00	0,05
	3	133,97	133,98	134,01	133,99	0,04
	4	133,94	133,96	134,02	133,97	0,08
	5	133,93	133,98	134,01	133,97	0,08
3	1	133,98	133,99	133,99	133,99	0,01
	2	133,95	134,00	134,02	133,99	0,07
	3	133,94	133,96	134,01	133,97	0,07
	4	133,98	134,00	134,01	134,00	0,03
	5	133,94	133,97	133,99	133,97	0,05
4	1	133,97	133,98	133,98	133,98	0,01
	2	133,96	133,98	134,03	133,99	0,07
	3	133,98	133,98	133,99	133,98	0,01
	4	133,96	134,00	134,02	133,99	0,06
	5	133,95	133,98	133,99	133,97	0,04
5	1	133,98	133,99	134,03	134,00	0,05
	2	133,96	133,98	133,98	133,97	0,02
	3	133,97	133,98	133,98	133,98	0,01
	4	133,94	133,97	134,02	133,98	0,08
	5	133,92	133,96	133,98	133,95	0,06
6	1	133,97	134,00	134,02	134,00	0,05
	2	133,94	133,96	133,99	133,96	0,05
	3	133,94	133,97	133,99	133,97	0,05
	4	133,94	133,96	133,98	133,96	0,04
	5	133,93	133,96	133,97	133,95	0,04
7	1	133,92	133,96	134,00	133,96	0,08
	2	133,92	133,96	134,00	133,96	0,08
	3	133,94	133,95	133,98	133,96	0,04
	4	133,94	133,95	133,97	133,95	0,03
	5	133,94	133,94	133,95	133,94	0,01
8	1	133,94	133,97	133,99	133,97	0,05
	2	133,94	133,97	134,00	133,97	0,06
	3	133,92	133,96	133,97	133,95	0,05
	4	133,90	133,95	133,97	133,94	0,07
	5	133,92	133,92	133,94	133,93	0,02

(conclusão)						
Amostra	Peça	Minb [mm]	Intb [mm]	Maxb [mm]	Medb [mm]	Varb [mm]
9	1	133,94	133,96	133,96	133,95	0,02
	2	133,95	133,95	133,95	133,95	0,00
	3	133,95	133,95	133,95	133,95	0,00
	4	133,92	133,93	133,95	133,93	0,03
	5	133,93	133,94	133,94	133,94	0,01
10	1	133,95	133,95	133,96	133,95	0,01
	2	133,94	133,95	133,96	133,95	0,02
	3	133,94	133,94	133,96	133,95	0,02
	4	133,93	133,95	133,95	133,94	0,02
	5	133,92	133,94	133,95	133,94	0,03

APÊNDICE C

RESULTADO DAS MEDIÇÕES DE DIÂMETRO PÓS CORTE

(continua)

Amostra	Posição	Peça	Mina [mm]	Inta [mm]	Maxa [mm]	Meda [mm]	Vara [mm]	Corte [mm]
1	30°	1	134,20	134,34	134,52	134,35	0,32	15,25
		2	134,34	134,54	134,62	134,50	0,28	14,60
		3	134,34	134,68	134,76	134,59	0,42	16,00
		4	134,42	134,58	134,70	134,57	0,28	15,60
		5	133,66	133,74	133,86	133,75	0,20	12,90
2	60°	1	133,72	133,86	134,04	133,87	0,32	13,20
		2	133,76	133,78	134,06	133,87	0,30	12,70
		3	133,84	134,06	134,20	134,03	0,36	13,80
		4	133,90	134,02	134,16	134,03	0,26	14,60
		5	133,78	134,12	134,24	134,05	0,46	14,00
3	90°	1	133,68	133,76	134,00	133,81	0,32	13,70
		2	133,62	133,86	134,08	133,85	0,46	14,20
		3	133,70	133,76	133,84	133,77	0,14	13,10
		4	133,60	133,74	134,00	133,78	0,40	13,70
		5	133,62	133,92	134,12	133,89	0,50	13,90
4	120°	1	133,74	133,90	134,02	133,89	0,28	13,50
		2	133,86	133,86	134,10	133,94	0,24	12,70
		3	133,78	133,82	134,02	133,87	0,24	13,70
		4	133,72	133,84	133,86	133,81	0,14	13,00
		5	133,60	133,84	134,00	133,81	0,40	13,50
5	150°	1	133,94	134,10	134,30	134,11	0,36	14,20
		2	133,80	134,10	134,30	134,07	0,50	14,00
		3	133,84	134,10	134,32	134,09	0,48	13,80
		4	134,00	134,20	134,30	134,17	0,30	14,20
		5	133,94	134,18	134,24	134,12	0,30	14,00
6	180°	1	134,04	134,12	134,40	134,19	0,36	15,10
		2	134,00	134,22	134,42	134,21	0,42	14,80
		3	134,08	134,18	134,38	134,21	0,30	15,00
		4	134,04	134,18	134,40	134,21	0,36	14,66
		5	134,20	134,40	134,56	134,39	0,36	16,30
7	210°	1	134,00	134,07	134,10	134,06	0,10	15,40
		2	134,00	134,17	134,25	134,14	0,25	15,60
		3	133,95	134,08	134,20	134,08	0,25	14,50
		4	133,96	134,01	134,10	134,02	0,14	14,54
		5	133,84	133,96	134,00	133,93	0,16	14,40
8	240°	1	133,42	133,62	133,90	133,65	0,48	13,20
		2	133,52	133,84	133,90	133,75	0,38	13,30
		3	133,52	133,60	133,80	133,64	0,28	13,30
		4	133,38	133,60	133,80	133,59	0,42	13,70
		5	133,60	133,70	133,86	133,72	0,26	13,40

(conclusão)

Amostra	Posição	Peça	Mina [mm]	Inta [mm]	Maxa [mm]	Meda [mm]	Vara [mm]	Corte [mm]
9	270°	1	133,82	133,86	133,96	133,88	0,14	14,40
		2	133,82	133,92	134,20	133,98	0,38	14,30
		3	133,62	133,84	134,10	133,85	0,48	14,40
		4	133,72	133,84	134,14	133,90	0,42	13,30
		5	133,90	133,90	134,20	134,00	0,30	14,40
10	300°	1	133,64	133,70	133,98	133,77	0,34	14,20
		2	133,76	133,88	134,04	133,89	0,28	14,00
		3	133,54	133,76	134,06	133,79	0,52	13,40
		4	133,60	133,84	134,10	133,85	0,50	14,00
		5	133,82	133,86	134,02	133,90	0,20	13,60