

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

GABRIEL DEZORDI TEIXEIRA

**RELAÇÃO ENTRE GRANULOMETRIA E RESISTIVIDADE ELÉTRICA NO AÇO
1045 ATRAVÉS DO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO POR CORRENTES PARASITAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2017

GABRIEL DEZORDI TEIXEIRA

**RELAÇÃO ENTRE GRANULOMETRIA E RESISTIVIDADE ELÉTRICA
NO AÇO 1045 ATRAVÉS DO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO POR
CORRENTES PARASITAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin

PONTA GROSSA

2017

Espaço destinado a elaboração da ficha catalográfica sob responsabilidade exclusiva do Departamento de Biblioteca da UTFPR.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Ponta Grossa
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Mecânica
Bacharelado em Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

RELAÇÃO ENTRE GRANULOMETRIA E RESISTIVIDADE ELÉTRICA NO AÇO
1045 ATRAVÉS DO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO POR CORRENTES PARASITAS
por

GABRIEL DEZORDI TEIXEIRA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 27 de novembro de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Ma.Sandra Mara Kaminski Tramontin
A Orientadora

Profa. Ma.Heliety Rodrigues Borges Barreto
Membro Titular

Prof. Dr.Luciano Augusto Lourençato
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho
Coordenador do Curso

- A Folha de Aprovação assinada encontra-se arquivada na Secretaria Acadêmica –

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Jeová Deus, que sempre foi meu Pai e que deu forças pra minha mãe e eu enfrentarmos os vários momentos difíceis ao longo da minha graduação, e por me abençoar tantas vezes me dando momentos de muita alegria. À Deus serei eternamente grato, e todo mérito é Dele.

Agradeço a minha mãe Neuza Dezordi - a quem amo muito, e que esteve comigo ao longo de todos esses anos, pois ela que é minha família, e que sempre se esforçou muito em cumprir seu papel de mãe, de pai, de conselheira e acima de tudo, de minha melhor amiga. Parabênzo a ela pela força que tem, e espero muito recompensá-la por todo o apoio e amor que sempre demonstrou por mim.

Agradeço a meu pai Ronaldo Carneiro Teixeira, por ter me apoiado financeiramente ao longo desses anos, por ter me dado a oportunidade de realizar meus estudos, e pelo exemplo de excelente profissional que é. Minha vó Irene, que desde que eu era pequeno se preocupou comigo, com meus estudos, e que sempre acreditou muito em mim e no meu potencial.

Agradeço aos meus amigos, que são mais que irmãos: Deise, Ricardo e Karina junto com sua família, que em todos os momentos estiveram preocupados comigo, me encorajaram, me deram conselhos, e que mesmo distante estiveram presentes e sempre provando quão forte nossa amizade é. Agradeço pela amizade, fraternidade e exemplo. Érika, minha irmã de criação, que ao longo da vida sempre se mostra presente na nossa família independentemente de onde estamos morando, e que sempre acreditou que eu sou mais forte do que penso, graças a Jeová Deus.

Querida tia Kethelle que também é uma das pessoas a quem mais devo, por sempre ter demonstrado de inúmeras formas que gosta muito de mim e que se preocupa com meu futuro. Agradeço por me deixar quase que fazer parte de sua família, e sempre ter me ajudado tanto. Sou grato a Ananda, a quem também posso chamar de irmã, pois sempre foi minha amiga e confidente independentemente da situação ou localidade.

Às minhas queridas colegas Iasmim e Nayssa, que em Pato Branco estiveram sempre ao meu lado e que juntos enfrentamos os momentos de desespero com muito humor e companheirismo. Thais e Shayemme que são minhas companheiras

leais e a quem devo muito, pois desde que cheguei no câmpus Ponta Grossa estiveram comigo, compartilharam de excelentes momentos em que vivi e resistiram aos meus inúmeros dramas. Espero sempre ter vocês por perto.

Agradeço à UTFPR e corpo docente pelo ensino, recursos, infraestrutura e orientação dada a mim ao longo desses anos, e em especial à Heliety, Anderson, Gerson e à minha orientadora de monitoria, TCC e estágio (só deu ela) - Sandra Tramontim, pelo apoio que me deu, a oportunidade da monitoria e por ser tão querida.

Devo muitos agradecimentos à WestRock Brasil, juntamente com meu padrinho Jânio Rosa, os engenheiros(a) Felipe Ribeiro, Hugo Gomes, Erci Santos, Carlos Silva, Diego Bonfanti, Sílvio Fante, Afonso Bittencourt, Marcelo Wolff, Janaína Rodrigues, os projetistas Fernando e Cláudio, a melhor analista administrativa Graziela Penteado e minha amiga e super engenheira Thaiza Pereira por terem me dado a oportunidade de realizar o melhor estágio do Brasil junto à vocês, por terem me recebido tão bem na empresa e no Departamento de Engenharia, e pelo aprendizado imenso que me foi passado tanto em gerenciamento de projetos como em respeito, integridade, excelência e responsabilidade. Sem a oportunidade que vocês me deram, eu não estaria tão perto do diploma.

Enfim, são muitos e grandes motivos que tenho pra me alegrar e agradecer. Saibam que é muito importante contar com vocês, e nesse passo gigante de agradecer - muito obrigado: Por vocês, serem vocês.

“Se eu não puder fazer coisas grandiosas,
posso fazer pequenas coisas de uma
forma grandiosa.” (KING, Martin Luther).

RESUMO

TEIXEIRA, G. D. **Relação entre Granulometria e Resistividade Elétrica no Aço 1045 através do Ensaio Não Destrutivo por Correntes Parasitas**. 2017. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Mecânica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

Na engenharia, tanto na parte de projetos mecânicos, como em manutenções industriais, sempre é necessário saber com que material algum equipamento foi fabricado. Em caso de falhas ou defeitos na estrutura de equipamentos, é importante investigar qual é a causa e onde estão. É comum a realização de ensaios não destrutivos para obter as respostas dessas perguntas, e o método de ensaio por correntes parasitas também é uma forma de se ter essas informações. O objetivo deste trabalho foi de estabelecer a relação do tamanho de grão do aço 1045 e a resistividade elétrica deste. Após a realização de diferentes tratamentos térmicos em 12 amostras de aço 1045, prepará-las metalograficamente, dimensionar os seus tamanhos de grãos, e realizar o ensaio não destrutivo para obtenção dos valores dos ângulos de fase da condutividade elétrica, detectou-se que quanto menor for o tamanho de grão, menor será a resistividade elétrica do aço.

Palavras-chave: Ensaio. Não Destrutivo. Correntes. Parasitas. Aço 1045.

ABSTRACT

TEIXEIRA, G. D. **Relation Between Granulometry and Electrical Resistivity in Steel 1045 through the Non Destructive Testing by Parasitic Currents**. 2017. 65 f. Final Project (Mechanical Engineering Course), Federal Technological University of Paraná. Ponta Grossa, 2017.

In engineering, both in mechanical design and maintenance industrial equipment, it is always necessary to know what material some equipment was manufactured. In case of failures or defects in the equipment structure, it is important to investigate what the cause is and where are the defects. It is common to do destructive tests to obtain such information, and the parasitic test is one of the means that can be used. The goal of this work was establish the relation of grain size of 1045 steel and its electrical resistivity. After the realization of different thermal treatments in 12 samples of 1045 steel, prepare them metallographically, measure their grain sizes, and do the non-destructive test to obtain the values of the electrical conductivity phase angles, it was detected that the lower the grain size is, the lower is the electrical resistivity of the steel.

Keywords: Test. Non-Destructive. Current. Parasites. Steel 1045.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama de fases Fe-C para o aço.	18
Figura 2 - Fotomicrografia de ferrita α com ampliação de 90 vezes.	20
Figura 3 - Fotomicrografia de austenita com ampliação de 325 vezes.	21
Figura 4 - Fotomicrografia de aço eutetóide com a microestrutura da perlita, que consiste em camadas de ferrita α (parte clara) e cemenita (parte escura), com ampliação de 500 x.	22
Figura 5 – Amostras de aço 1045	27
Figura 6 - Relação entre temperatura de aquecimento e resfriamento e teor de carbono ocorrente no recozimento pleno.	30
Figura 7 - Relação entre temperatura de aquecimento e resfriamento e teor de carbono ocorrente na normalização	31
Figura 8 - Demonstração do procedimento de obtenção das diagonais para o cálculo de dureza Vickers pelo durômetro.	33
Figura 9 - Princípio de funcionamento por correntes parasitas	36
Figura 10 - Princípio de detecção por correntes parasitas	37
Figura 11 - Posições das descontinuidades	38
Figura 12 - Exemplo de equipamento utilizado em ensaio por correntes parasitas com gráfico formado no visor do aparelho detector.	39
Figura 13 - Fluxograma do Procedimento Experimental	42
Figura 14 – Embutidora Manual Maxi Press Metalotest	45
Figura 15 - Lixadeira e Politriz Arotec	46
Figura 16 - Amostra após preparação	46
Figura 17 - Reticulado utilizado para classificar o tamanho de grãos do aço 1045... ..	47
Figura 18 - Equipamento Olympus Nortec 500 D	48
Figura 19 - Sondas utilizadas para o ensaio por correntes parasitas	49
Figura 20 - Curva de Resistividade com frequência de 25 kHz	51
Figura 21 - Curva de Resistividade com frequência de 50 kHz	52
Figura 22 - Curva de Resistividade com frequência de 75 kHz	53
Figura 23 - Durômetro Shimadzu	54
Gráfico 1 - Relação do Ângulo de Fase da Amostra Padrão com a Variação da	59
Gráfico 2 - Relação dos Ângulos de Fase das Amostras Tratadas Termicamente com a Variação da Frequência no Ensaio por Correntes Parasitas	60
Gráfico 3 - Relação do tamanho de grão com resistividade elétrica do aço 1045..... ..	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista parcial de denominação normativa ABNT, AISI/SAE.....	23
Tabela 2 - Resistência específica de metais	26
Tabela 3 - Divisão de amostras para realização do tratamento térmico.....	44
Tabela 4 - Resultado do teste de microdureza Vickers para amostras tratadas termicamente.....	56
Tabela 5 - Tamanho de grão das amostras após a realização dos tratamentos térmicos.....	57
Tabela 6 - Ângulos de fase para diferentes valores de frequência do ensaio	58

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

LISTA DE ABREVIATURAS

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASMT	American Society for Testing and Materials
SI	Système International d'Unités
NBR	Norma Brasileira
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
USB	Universal Serial Bus
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada

LISTA DE ACRÔNIMOS

AISI	American Iron and Steel Institute
SAE	Society of Automotive Engineers – EUA

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVO GERAL	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 MATERIAIS METÁLICOS	17
2.2 AÇOS.....	17
2.3 TAMANHO DE GRÃO.....	23
2.4 RESISTIVIDADE.....	25
2.5 AÇO 1045	26
2.6 TRATAMENTOS TÉRMICOS	27
2.7 ENSAIOS MECÂNICOS DESTRUTIVOS	32
2.7.1 Ensaio de Dureza Vickers.....	32
2.8 ENSAIOS MECÂNICOS NÃO DESTRUTIVOS	34
2.8.1 Ensaio Não Destrutivos – Correntes Parasitas	36
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	41
3.1 OBTENÇÃO DA AMOSTRA	42
3.2 TRATAMENTO TÉRMICO.....	43
3.3 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA	45
3.3.1 Metodologia do Ensaio de Microscopia Ótica	46
3.4 ENSAIOS POR CORRENTES PARASITAS.....	48
3.4.1 Equipamentos Utilizados	48
3.4.2 Metodologia do Ensaio por Correntes Parasitas.....	49
3.5 METODOLOGIA DO ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS	55
4.2 DETERMINAÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO POR MICROSCOPIA ÓTICA ...	57
4.3 ENSAIO DE CORRENTES PARASITAS.....	58
5 CONCLUSÃO	62
REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

Em qualquer projeto na área de engenharia, é estritamente necessário conhecer bem cada componente, bem como o material que este é composto. Indústrias, principalmente na área metalúrgica, se preocupam com a verdadeira composição dos componentes adquiridos, bem como formas de encontrar discontinuidades ou indentificar a causa de alguma falha presente no equipamento. Cada material possui propriedades mecânicas e físicas, que variam com as condições de uso. Uma das formas de conhecer essas variações é a utilização dos ensaios mecânicos, que podem ser destrutivos ou não destrutivos.

O ensaio não destrutivo por correntes parasitas já possui muitas aplicações, e se diferencia pela sua capacidade de determinar não apenas discontinuidades, mas também características físicas como, por exemplo, resistividade, espessura de camadas, condutividade térmica dentre outros. Além disso, por meio desse ensaio é possível estudar a composição química, dureza, microestrutura e assim realizar a diferenciação de metais.

Alguns pesquisadores, por meio deste ensaio, já conseguiram realizar separações de diferentes composições químicas no aço, estudar as limitações do ensaio não destrutivo por correntes parasitas em tubos ferromagnéticos instalados em trocadores de calor, a relação entre um tratamento térmico e a condutividade elétrica, além de otimizar parâmetros de ajuste utilizados no ensaio.

Analisando a influência da temperatura de revenimento, (IANKE, 2016) concluiu que com o aumento da temperatura, obtêm-se menores valores de dureza, menores valores de ângulo de fase e maior condutividade elétrica do aço.

Foi comprovado em pesquisa, avaliando três diferentes variáveis do processo: frequência de teste, fração de enchimento e avaliação por harmônica, que por usar uma frequência de 4 Hz e harmônica de 1ª ordem, consegue-se obter um acerto de 96% na separação de diferentes composições químicas do aço, enquanto a variação de fator de enchimento tem pouca influência nos resultados. (MENDES, 2009)

Apesar do ensaio não destrutivo por correntes parasitas ser capaz de detectar com relativa confiabilidade a maioria dos tipos de discontinuidades, em

trincas circunferenciais, a tecnologia utilizada no ensaio ainda não é suficiente para analisar de forma precisa esse tipo de trincas. (ALENCAR, 2012)

Em meio a muitas pesquisas realizadas sobre os ensaios não destrutivos por correntes parasitas, a maioria destacam estudos de casos onde este método é usado em análises de microestruturas, além de análises e separações de composições químicas de materiais. No entanto, tratando-se de tamanho de grão, em alguns aspectos têm-se pouca informação. Poderia um estudo de tamanho de grão relacionado a algumas propriedades físicas de materiais, produzir algum resultado favorável em ensaios não destrutivos por correntes parasitas?

Sendo assim, é necessário realizar um estudo nesse aspecto. A propriedade física do material que será investigada é a resistividade elétrica. É possível estabelecer uma relação entre a resistividade elétrica e a granulometria dos aços, pelo método de correntes parasitas? Caso exista essa relação, esta será apresentada por meio desse trabalho.

A utilização de correntes parasitas abordada por outros pesquisadores costuma ser focada na microestrutura em si, na relação com as descontinuidades encontradas, e em casos reais onde esse ensaio foi utilizado. No entanto, pode-se expandir o conhecimento nessa área por estudar o tamanho de grão e sua relação com a resistividade elétrica do material. Foi comprovado que a microestrutura e a condutividade elétrica estão relacionadas, dando assim um embasamento para certificar-se a existência dessa nova relação. (IANKE, 2016)

Sendo assim, o ensaio não destrutivo por meio de correntes parasitas pode se enquadrar como uma metodologia coadjuvante na análise e caracterização de materiais, por meio do estudo do tamanho do grão. Ocorrendo isso, têm-se uma forma mais rápida e simples de verificação granulométrica. Depois de feita essa verificação, então pode ser analisada a necessidade do sacrifício da peça para metalografia.

Como exemplo de aplicação para este caso, pode-se citar chapas que passam por embutimento ou conformação e que possuem algum defeito, como a presença de ranhuras ou ondulações na superfície. Com isso, pode-se suspeitar que estas chapas tenham microestrutura grosseira. Para se certificar de que é esta a origem do problema, realiza-se este ensaio como primeiro teste. E devido a uma microestrutura grosseira acarretar em problemas futuros no desempenho da peça,

este ensaio não destrutivo por correntes parasitas pode evitar futuros prejuízos e desperdícios para uma empresa da área.

O desenvolvimento de técnicas não destrutivas para aval e caracterização de materiais pode contribuir de forma menos agressiva, poupando a peça ou equipamento de testes mais drásticos - pelo menos no início da análise - além de poder ser realizado no próprio conjunto montado. Ao se ter ideia do que está causando o defeito da peça e a origem do problema, consegue-se de forma mais eficaz de identificar o que precisa ser verificado mais a fundo, e então prosseguir na pesquisa em busca de uma solução.

Ao se realizar tratamentos térmicos em um tipo de aço visando a obtenção de diversas granulometrias, no caso diferentes tamanhos de grão no mesmo material, obtendo-se diferentes amostragens, estas poderão ser analisadas pela técnica de correntes parasitas, realizando uma comparação das resistividades com o material padrão do equipamento, no caso o cobre. Sendo assim, é possível que se chegue a uma relação entre essas duas variáveis, tamanho do grão e a resistividade, e esta relação poderá então ser útil no estudo inicial da origem de falhas em equipamentos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Relacionar os tamanhos de grãos e a resistividade elétrica do aço 1045 em granulometrias diferentes obtidas por tratamentos térmicos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar os ciclos de tratamentos térmicos, com velocidade de resfriamento controlada, visando obter diferentes tamanhos de grão no mesmo material.
- Fazer preparação metalográfica e dimensionar os diferentes tamanhos de grão obtidos com os tratamentos térmicos aplicados, utilizando microscopia ótica.
- Utilizar a técnica de microdureza Vickers para a avaliação das variações de propriedades mecânicas com relação às granulometrias obtidas por tratamentos térmicos.

- Executar o ensaio não destrutivo por correntes parasitas para então diagnosticar e estabelecer a relação entre o tamanho de grão e a resistividade elétrica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MATERIAIS METÁLICOS

Dentre os grupos de materiais existentes, estão os materiais metálicos. Estes são substâncias inorgânicas, e sua composição consiste em elementos metálicos. Existem casos em que elementos não metálicos, como carbono, oxigênio e nitrogênio estão presentes, então estes precisam ter sua composição ajustada e os seus níveis de impurezas precisam ser reduzidos. (CALLISTER, 2006)

Subclasses são formadas dentro dos materiais metálicos: ferros e aços, onde o ferro está bastante presente. Existem também as ligas não ferrosas, as superligas, onde a porcentagem de ferro presente é pequena.

As ligas metálicas têm propriedades semelhantes às dos metais. Há ligas formadas apenas por metais, as que são misturas homogêneas de metais e semimetais, e as que são formadas por metais e não metais, como por exemplo, o carbono. Algumas ligas metálicas comuns são o aço, aço inox, ouro, latão e a solda. (CALLISTER, 2006)

As características que mais são levadas em consideração em um material metálicos são sua composição química, seu estado metalúrgico e sua forma. Quanto à aplicação, o que define é a sua composição química, estrutura cristalina e tratamento térmico utilizado. (SMITH, 2012)

2.2 AÇOS

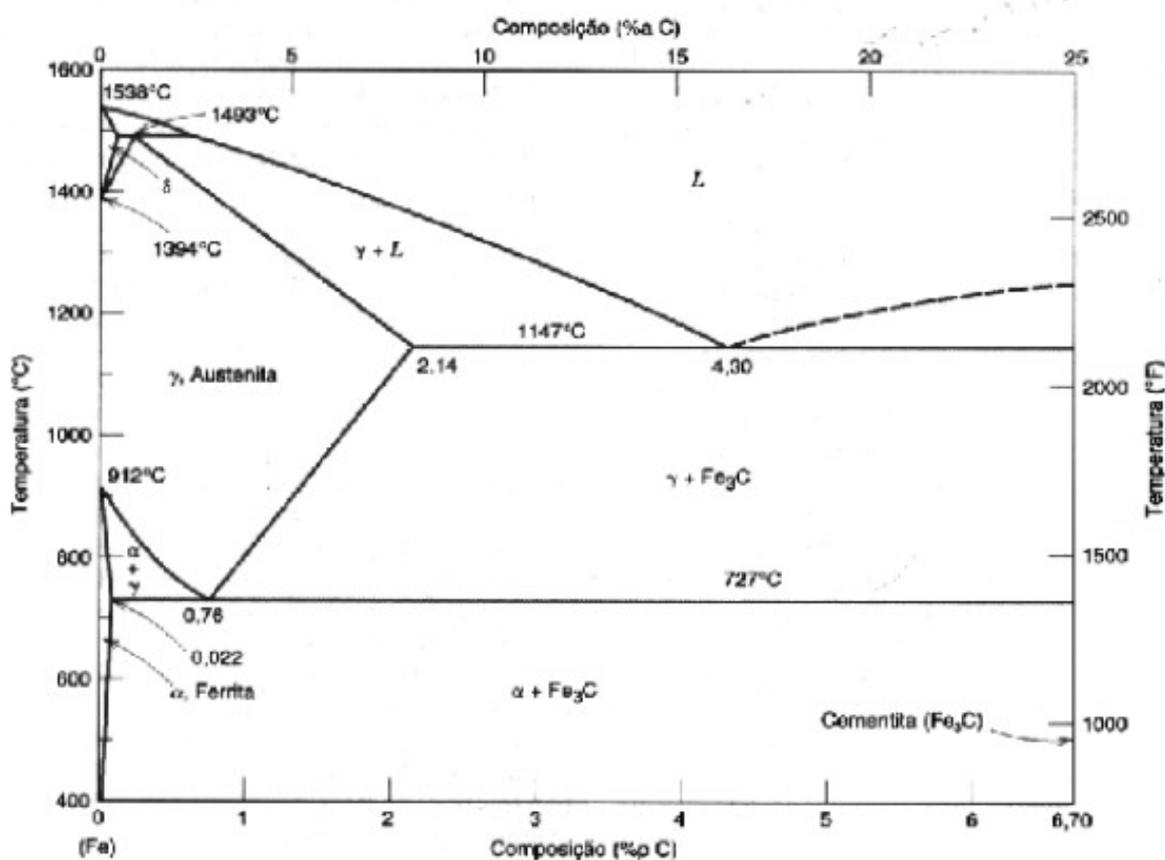
Os aços podem ser classificados como um dos materiais de maior aplicação, desde os utensílios domésticos até equipamentos industriais e construção civil. É reconhecido como a liga mais versátil das conhecidas atualmente.

Define-se o aço como uma liga ferro-carbono, pois contém de 0,008% a 2,11% de carbono, além de resíduos provenientes de sua fabricação, sendo que o menor valor está relacionado à solubidade do carbono em temperatura ambiente,

e o maior valor relacionado à máxima capacidade do carbono se dissolver no ferro quando atinge uma temperatura de 1140°C (CHIAVERINI, 1996).

Ao estudar sobre aços, é comum nos depararmos com o diagrama de fases, ou diagrama ferro/carbono como indicado na Figura 1. Nele, observa-se que a máxima porcentagem de carbono encontrado no aço é 6,7%. Até esse limite, têm-se ferro carboneto de ferro. Acima de 6,7% encontra-se cementita, que tem como característica ser dura e frágil.

Figura 1 - Diagrama de fases Fe-C para o aço.



Fonte: CALLISTER, (2006)

São encontradas no diagrama, regiões com fases diferentes. Na parte inferior à direita, onde se encontram as maiores concentrações de carbono, existe uma mistura das fases ferrita α e cementita. Esta mistura bifásica é conhecida como perlita. À temperatura ambiente, têm-se a presença da fase CCC (cúbica de corpo centrado) da ferrita α na sua forma estável, e isso pode ser localizado no diagrama na parte inferior à esquerda.

Encontra-se a presença de ferrita δ na extremidade superior à esquerda. A ferrita δ possui estrutura semelhante à ferrita α , porém sua solubilidade ao carbono é bem maior. Algo que também as difere é a faixa de temperatura que cada uma é encontrada. A austenita está entre as fases de ferrita α e δ (NEWELL, 2010).

O diagrama apresenta várias temperaturas e linhas que são relevantes na prática. Têm-se o ponto eutetóide a 723°C, com 0,76% de carbono, o ponto eutético a 1147°C, com 4,3% de carbono e o ponto peritético a 1493 °C, com 0,53% de carbono. (NEWELL, 2010).

Esses pontos são muito importantes para determinar as condições de resfriamento ou aquecimento do aço. Essas condições dependem do tratamento térmico que este irá passar e em que condição irá operar, visto que a quantidade de carbono presente influencia nas propriedades mecânicas do aço, como por exemplo, na dureza, fragilidade, ductilidade, tenacidade dentre outras. (CHIAVERINI, 2006)

Outras propriedades que podem ser especificadas por serem relevantes no aço ou em uma liga são sua composição, o tamanho de grão, as propriedades mecânicas, temperabilidade, resistência ao impacto, tração e compressão além das propriedades físicas. (COSTA E SILVA, 2006).

A ferrita (Figura 2) é uma solução sólida de carbono em ferro CCC e existe até a temperatura de 912°C, temperatura na qual a solubilidade do carbono no ferro é muito baixa, chegando num máximo de 0,02% a 727°C. (CHIAVERINI, 2006)

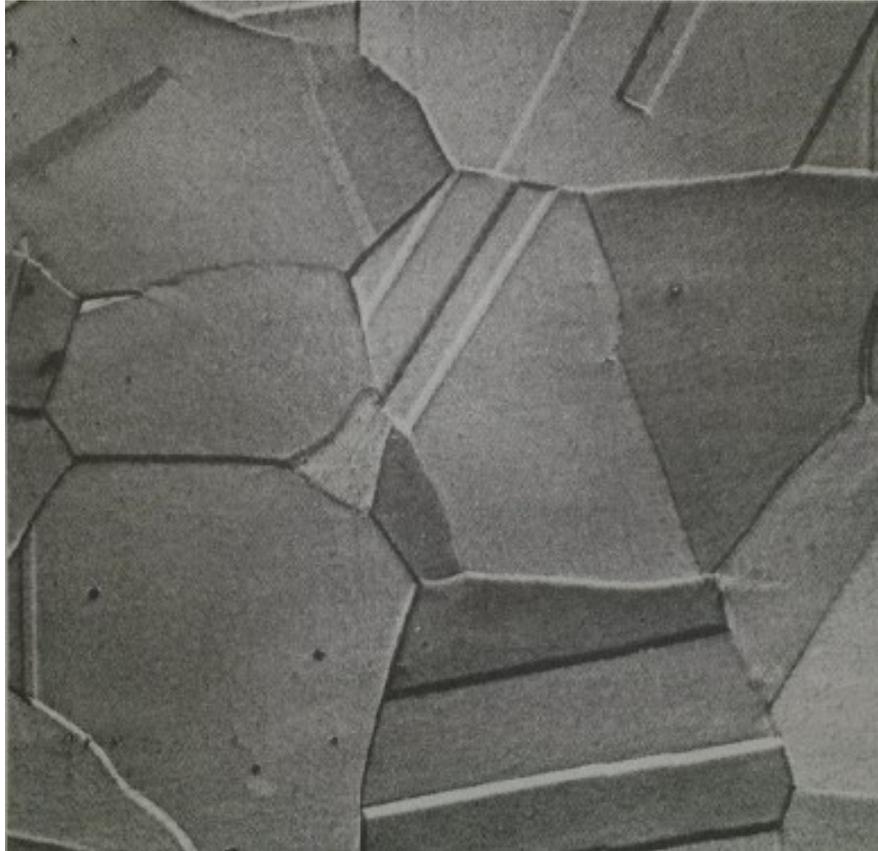
Figura 2 - Fotomicrografia de ferrita α com ampliação de 90 vezes.



Fonte: CALLISTER, (2007)

A austenita (Figura 3) é uma solução sólida de carbono no ferro CFC (cúbico de face centrada) sendo encontrada entre temperaturas de 727°C e 1495°C. A solubilidade máxima do carbono no ferro neste tipo de solução é de 2,11% a 1148°C. Separam-se os produtos siderúrgicos aço e ferro fundido com base no teor de carbono no ferro. Os aços possuem teores de carbono de até 2% em peso, já os ferros fundidos possuem mais de 2% de teor de carbono em peso. (CALLISTER, 2007)

Figura 3 - Fotomicrografia de austenita com ampliação de 325 vezes.



Fonte: CALLISTER, (2007)

A cementita, também denominada carboneto de ferro Fe_3C contém 6,7% de C e estrutura cristalina ortorrômbica. Suas principais características são apresentar elevada dureza, baixa resistência, baixa ductilidade e baixa tenacidade.

A perlita (Figura 4) existe como colônias, e dentro de cada colônia, as camadas são orientadas na mesma direção. Porém essa direção varia de uma colônia para a outra. As camadas mais claras são a fase ferrita, e as camadas mais escuras a fase cementita. As propriedades da perlita são intermediárias entre a maciez e ductilidade da ferrita, e a dureza e fragilidade da cementita. (CALLISTER, 2007).

Figura 4 - Fotomicrografia de aço eutetóide com a microestrutura da perlita, que consiste em camadas de ferrita α (parte clara) e cemenita (parte escura), com ampliação de 500 vezes.



Fonte: CALLISTER, (2007)

A classificação dos aços é diferente das ligas especiais. Existem os aços de baixo, médio e alto carbono. Como método de classificação, baseiam-se nas características do aço ou da liga, analisando suas propriedades mecânicas e composição química, ou também se classifica baseando na aplicação do aço ou liga, como por exemplo, se este será utilizado em altas ou baixas temperaturas, ou construção mecânica. (COSTA E SILVA, 2006)

O aço é muito utilizado devido à sua ampla aplicabilidade, e por oferecer bom desempenho a custo baixo, pois há grande disponibilidade de ferro e constantes otimizações nos processos de fabricação do aço.

Os aços são classificados no Brasil seguindo os modelos da ABNT, porém estes modelos são muito semelhantes ao da AISI (American Iron and Steel Institute) e pela SAE (Society of Automotive Engineers: SAE J404). São formados grupos principais, e dentro desses, as famílias de aços com características semelhantes. Para a nomenclatura dos aços usam-se geralmente quatro algarismos. Como exemplo, pode-se citar o aço 1045, que será utilizado. É um aço

da família 10 (aços carbonos), com 45 centésimos de porcentagem de carbono. Por isso emprega-se o “45”, representando 0,45% de C. (COSTA E SILVA, 2003).

Na Tabela 1 pode-se ver uma lista parcial da classificação normativa SAE/AISI.

Tabela 1 - Lista parcial de denominação normativa ABNT, AISI/SAE

Tipo de aço	Chave numérica
Aço carbono	10xx
ressulfurado	11xx
ressulfurado e refosforizado	12xx
Aço manganês Mn 1.75%	13xx
Aço níquel Ni 3.50%	23xx
Ni 5.00%	25xx
Aço níquel cromo Ni 1.25% ; Cr 0.65 e 0.80%	31xx
Ni 1.75% ; Cr 1.07%	32xx
Ni 3.50% ; Cr 1.50% e 1.57%	33xx
Ni 3.00% ; Cr 0.77%	34xx
Aço molibdênio Mo 0.20 e 0.25%	40xx
Mo 0.40 e 0.52%	44xx
Aço cromo molibdênio Cr 0.50 , 0.80 e 0.95% ; Mo 0.12 , 0.20 , 0.25 e 0.30%	41xx
Aço níquel cromo molibdênio Ni 1.82% ; Cr 0.50 e 0.80% ; Mo 0.25%	43xx
Ni 1.05% ; Cr 0.45% ; Mo 0.20 e 0.35%	47xx
Ni 0.30% ; Cr 0.40% ; Mo 0.12%	81xx
Ni 0.55% ; Cr 0.50% ; Mo 0.20%	86xx
Ni 0.55% ; Cr 0.50% ; Mo 0.25%	87xx
Ni 0.55% ; Cr 0.50% ; Mo 0.35%	88xx
Ni 3.25% ; Cr 1.20% ; Mo 0.12%	93xx
Ni 0.45% ; Cr 0.40% ; Mo 0.12%	94xx
Ni 0.55% ; Cr 0.20% ; Mo 0.20%	97xx
Ni 1.00% ; Cr 0.80% ; Mo 0.25%	98xx
Aço níquel molibdênio Ni 0.85 e 1.82% ; Mo 0.20 e 0.25%	46xx
Ni 3.50% ; Mo 0.25%	48xx
Aços cromo Cr 0.27, 0.40, 0.50 e 0.65%	50xx
Cr 0.80, 0.87, 0.92, 0.95, 1.00 e 1.05%	51xx
Cr 1.45% ; C 1.00% min	52xxx
Aço cromo vanádio Cr 0.60, 0.80 e 0.95% ; V 0.10 e 0.15%	61xx
Aço cromo tungstênio W 1.75 ; Cr 0.75%	72xx
Aço silício manganês Si 1.40 e 2.00% ; Mn 0.65, 0.82 e 0.85% ; Cr 0 e 0.65%	92xx

Fonte: CARUSO, (2001)

2.3 TAMANHO DE GRÃO

Analisando a influência do tamanho de grão na resitividade elétrica, damos ênfase à utilização dos aços para fins eletromagnéticos. Alguns fatores microestruturais influenciam nas perdas magnéticas dos aços. Dentre esses fatores estão: a deformação plástica, que aumenta a densidade das discordâncias resultando na movimentação das paredes dos domínios, a composição química, que forma precipitados e inclusões influenciando no crescimento de grão e na movimentação das paredes do domínio, a textura e o tamanho de grão.

O tamanho de grão é uma medida que se obtêm através de metalografia. Preparam-se amostras metalograficamente, e estas amostras são atacadas com reagentes metalgráficos específicos para os aços, e então são avaliadas em microscópios de metalografia.

O contorno de grão atua como uma barreira ao movimento das discordâncias, pois nos grão, que possuem orientações diferentes, uma discordância que irá passar para dentro do outro grão precisará mudar sua direção de movimento, o que vai se tornando mais difícil à medida que o número de contornos de grão aumenta, pois a diferença na orientação cristalográfica aumentará também. (CALLISTER, 2007)

A importância da análise do tamanho de grão é que desta forma, pode-se verificar a qualidade do material, como sua ductilidade, tenacidade e resistência mecânica, principalmente quando são produtos de responsabilidade ou de elevada solicitação. Nestes casos, recomenda-se que a análise do tamanho de grão seja periódica. (TESTMAT, 2016).

Segundo a norma da ASMT (American Society for Testing and Materials), o tamanho de grão é especificado pelo seu diâmetro médio. O número do tamanho de grão ASTM (n), escala de medição mais difundida no mercado, é dado por:

$$N = 2^{n-1} \quad (1)$$

onde n é representado pelo tamanho de grão ASTM, e N é o número de grãos por pol² (polegada quadrada) medido com 100x de aumento.

Um material com granulação fina, ou seja, que possui grãos pequenos é mais duro e resistente do que um material com granulação grosseira. O que possui granulação fina possui maior área de contornos de grãos, e isso dificulta o movimento das discordâncias, tornando-o mais resistente, devido ao movimento dessas discordâncias fragilizarem o material. Metais com granulometria mais grosseira costumam ter maior ductilidade, enquanto os com granulometria fina, possuem maiores valores de limite de escoamento, limite de resistência à tração e dureza. (CALLISTER, 2007)

Para encontrar o tamanho de grão é utilizada a chamada metalografia quantitativa, que fornecem as informações necessárias dos materiais para o dimensionamento dos processos industriais.

Para determinar o tamanho de grão segundo a norma ASTM E-112, geralmente é utilizado o método do intercepto, onde linhas retas ou círculos são traçados sobre uma região da microestrutura do material analisado. Então se realiza a contagem do número de intersecções com contornos de grão (P) ou do número de grãos interceptados pela linha que foi traçada (N). Obtem-se então o número de intersecções por unidade de comprimento, que é determinado por dividir o valor de P ou N pelo comprimento linear da reta ou do círculo traçados na região da microestrutura do material. Chega-se assim, no valor de PL ou NL. Calcula-se também o valor inverso de PL ou NL denominado comprimento de intercepto linear (l), definido pela equação:

$$l = \frac{1}{PL} = \frac{1}{NL} \quad (2)$$

Então, relaciona-se o parâmetro l com o número de tamanho de grão ASTM (G):

$$G = -6,644 * (\log l) - 3,288 \quad (3)$$

A recristalização e o crescimento de grão é uma das aplicações desta técnica, onde se determina o tamanho e a superfície dos grãos cristalizados, como também a medida de frações recristalizadas, para o caso de materiais que passam por tratamentos térmicos ou laminação a quente.

2.4 RESISTIVIDADE

É definida como a resistência em ohms que é oferecida por uma unidade de volume (centímetro cúbico) de uma substância para o fluxo de corrente elétrica. A resistividade pode ser considerada o inverso da condutividade, pois se uma substância tem uma resistividade elevada, terá uma condutibilidade baixa, e vice-versa. A temperatura em que é feita a medição da resistência é especificada. Sabendo-se o tipo de metal de que o condutor é feito, você poderá obter a resistência específica do metal a partir de uma tabela. (TECEM, 2005)

Na Tabela 2, pode-se verificar a resistência específica de alguns, dos principais materiais geralmente estudados.

Tabela 2 - Resistência específica de metais

Substância	Substance	Resistência específica ou Resistividade Resistivity or specific resistance	
		Cm ³ (microohms)	Circular mil foot (ohms)
Prata	Silver	1,63	9,8
Cobre	Copper	1,72	10,4
Ouro	Gold	2,44	14,7
Alumínio	Aluminium	2,83	17,04
Carbono	Carbon	3,8 / 4,1
Tungstênio	Tungsten	5,5	33,2
Bronze	Brass	7,0	42,1
Aço	Steel	15,9	95,8
Nicrómio	Nichrome	109,0	660,0

Fonte: TECEM, 2005

A unidade no sistema internacional (SI) da resistividade é o ohm metro (Ωm). A resistência elétrica (R) de um dispositivo está relacionada com a resistividade ρ de um material por:

$$R = \rho * \frac{L}{A} \quad (4)$$

Onde:

ρ é a resistividade elétrica (Ωm);

R é a resistência elétrica de um espécime uniforme do material (Ω);

L é o comprimento do espécime (m);

A é a área da seção do espécime (m^2).

Essa relação não pode ser considerada geral, valendo apenas para materiais uniformes e isotrópicos, e que possuem seções transversais também uniformes. Os fios condutores normalmente utilizados para medição apresentam estas duas características.

2.5 AÇO 1045

Descreve-se o SAE 1045 (Figura 5) como um aço ao carbono com boa usinabilidade, resistência mecânica e forjabilidade, média soldabilidade e com baixa temperabilidade, tendo assim pouca penetração de dureza em sua seção transversal. Sua utilização geralmente consiste em durezas de 180 a 300 HB e é

mais recomendado para uso de seções menores. Para grandes seções é necessário realizar normalização como tratamento térmico.

Para componentes que necessitam uma resistência mecânica maior do que a que os aços de baixo carbono oferecem, o aço 1045 é bastante utilizado. Como exemplo têm-se cilindros, parafusos, grampos, pinças, pregos, eixos em geral, dentre outros componentes. Possuem boa soldabilidade, plasticidade, forjabilidade, e baixa usinabilidade. (GGDMetals, 2016)

As temperaturas para tratamentos térmicos de recozimento precisam estar entre 800 – 850°C, por no mínimo 1 hora para cada 25 mm, geralmente com resfriamento lento no forno e para normalização, e temperaturas entre 800 e 900°, por no mínimo 1 hora para cada 25 mm, com resfriamento em ar, ou ar forçado. A sua composição química de Carbono (0,43% - 0,50%), Magnésio (0,60% - 0,90%), Fósforo (0,04% máx) e Enxofre (0,05% máx.). (INDEX, 2016)

Figura 5 – Amostras de aço 1045



Fonte: Aatoria Própria

2.6 TRATAMENTOS TÉRMICOS

É possível modificar as propriedades mecânicas de um aço sem alterar sua forma, deixando-os, por exemplo, mais dúcteis ou tenazes pela realização de tratamentos térmicos. A velocidade de resfriamento, e a quantidade de carbono

contido no aço, influenciam nas modificações das propriedades do aço. (ANDRADE, 1997)

As três fases de um tratamento térmico são: aquecimento, manutenção da temperatura e resfriamento. Existem tratamentos térmicos que mudam as propriedades do aço em toda sua massa, como a têmpera, o recozimento e o revenimento. Outros tratamentos térmicos modificam somente as propriedades da superfície. Nesses casos, são aplicados no aço produtos químicos específicos junto ao tratamento térmico, como ocorre na nitretação e cementação. (ANDRADE, 1997)

Os tratamentos térmicos nem sempre são provocados. Como ocorre na soldagem de estruturas de aço, no decorrer do processo de fabricação, o aço passa por sucessivos aquecimentos e resfriamentos, e isso prejudica suas propriedades mecânicas. (TSCHIPTSCHIN, 2001)

Muitos definem os tratamentos térmicos como processos de fabricação, que servem para facilitar que outros processos sejam feitos posteriormente. Pode-se aumentar a resistência do material pela utilização dos tratamentos térmicos. Então, para restaurar a ductilidade após um processo de conformação, ou aumentar a usinabilidade de um material, por exemplo, são feitos os tratamentos em cima do aço. (TSCHIPTSCHIN, 2001)

Subdividem-se os tratamentos térmicos em grupos como: tratamentos de endurecimento e de amolecimento. É aplicado o tratamento de amolecimento para os casos de necessária redução da dureza, remoção de tensões residuais, refinamento de grãos do material ou para aumentar a tenacidade do aço. Os tratamentos de endurecimento são aplicáveis para casos onde se deseja aumentar resistência mecânica (resistência à fadiga ou fluência), ou resistência ao desgaste. (TSCHIPTSCHIN, 2001)

Para o endurecimento do aço, é essencial que exista carbono suficiente para conseguir o endurecimento. Caso tenha a quantidade de carbono necessária, é utilizado o tratamento térmico de têmpera.

Todas as propriedades mecânicas do aço dependem da sua microestrutura. Uma vez conhecida como é a formação dos microconstituintes antes e após a realização do tratamento térmico, fica mais fácil escolher o material e tratamento adequado para se obter as propriedades mecânicas desejadas.

Os fatores que influenciam os tratamentos térmicos são o aquecimento, o tempo de permanência à temperatura e o resfriamento.

O aquecimento é realizado a uma temperatura acima da temperatura crítica do material, para que se tenha a completa austenitização do aço, sendo assim, ocorre a dissolução do carbeto de ferro gama. A austenitização é importante, pois é a partir dela que as outras transformações ocorrem. Parâmetros que devem ser bem estabelecidos são a velocidade de aquecimento e temperatura de aquecimento máxima. (SPECTRU, 2006)

A temperatura de aquecimento costuma ser um fator fixo, e é determinado segundo as propriedades finais desejadas do aço, e o teor de carbono nele existente, o que varia dependendo da aplicação que o aço terá. Quanto mais alta for a temperatura, mais os grãos de austenita estarão presentes, pois ocorrerá a completa dissolução do ferro gama. (SPECTRU, 2006)

O tempo de permanência à temperatura precisa ser determinado com cautela, pois quanto mais longo for o tempo de exposição do aço à temperatura considerada de austenização, mais completa será a dissolução do carboneto de ferro ou até de outras fases que estão presentes no ferro gama, resultando num maior tamanho de grão. (SPECTRU, 2006)

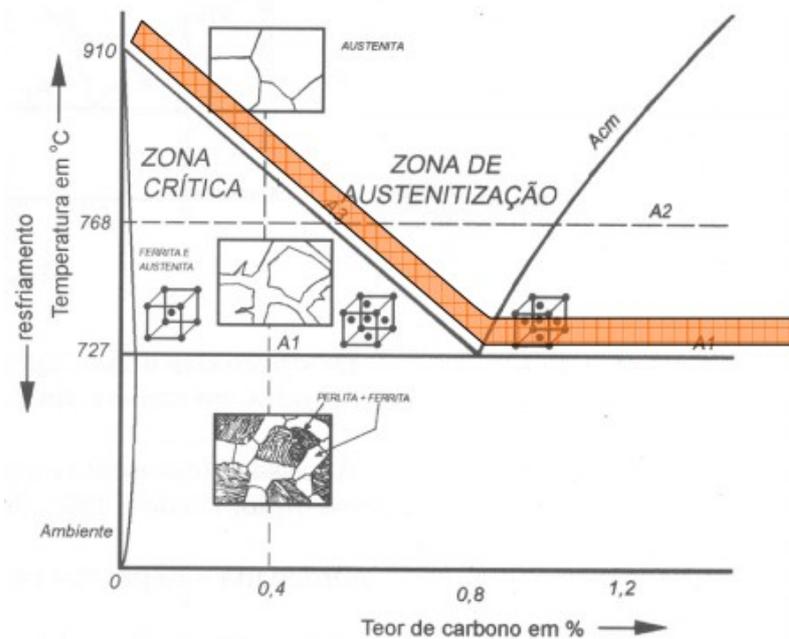
Para que se obtenha a modificação estrutural, procura-se ter uma temperatura mais elevada, pois será mais vantajosa do que um tempo mais longo em uma temperatura inferior, pois possuirá maior mobilidade atômica. De qualquer modo, o tempo à temperatura deve ser pelo menos o suficiente para uniformizar toda seção do aço.

O resfriamento é o que determinará a estrutura e as propriedades finais do aço. Variando a velocidade que é feita o resfriamento, pode-se obter perlita grosseira, que possui baixa resistência mecânica, ou martensita, que possui a maior dureza resultante da realização de um tratamento térmico. O resfriamento pode ser feito por meio de soluções aquosas, ar, óleo ou água.

O recozimento é capaz de remover tensões residuais que ocorrem devido a tratamentos mecânicos a frio ou a quente, diminui a dureza para melhorar a usinabilidade do aço, altera propriedades como ductilidade, resistência mecânica, modifica características elétricas e magnéticas, reduz ou aumenta o tamanho de grão, e define a microestrutura ou elimina efeitos de tratamentos térmicos feitos anteriormente. Uma das formas de recozimento mais utilizadas é o recozimento

total ou pleno (Figura 6) onde se aquece o aço acima da sua zona crítica durante o tempo necessário para que se tenha solução de carbono ou de elementos de liga no ferro gama, sendo feito posteriormente um resfriamento lento controlado. (SPECTRU, 2006)

Figura 6 - Relação entre temperatura de aquecimento e resfriamento e teor de carbono ocorrente no recozimento pleno.



Fonte: Tschiptschin (2001)

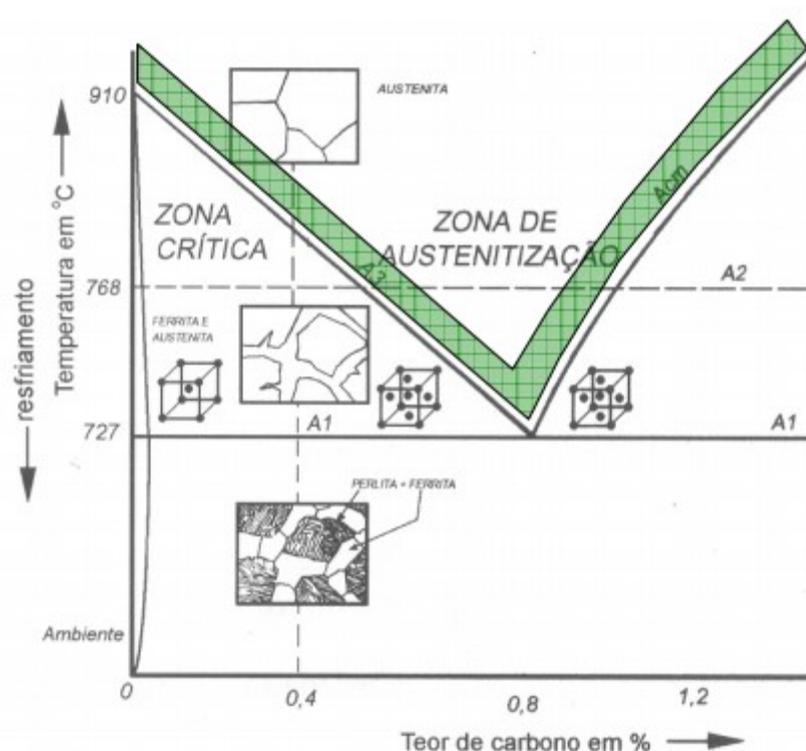
Como esse tipo de recozimento muitas vezes leva um tempo muito longo para ser realizado, alguns o substituí pelo recozimento cíclico, onde é realizado o aquecimento do aço nas mesmas condições presentes no recozimento total, e após isso é feito o esfriamento rápido do aço em mesmas condições que é realizado no recozimento total. O esfriamento é feito primeiramente de forma rápida até uma temperatura localizada dentro da parte superior do diagrama de transformação isotérmico, sendo o aço mantido o tempo necessário para que se produza a transformação completa. Em seguida, novamente é feito outro o resfriamento, que vai até a temperatura ambiente. (SPECTRU, 2006)

O recozimento para alívio de tensões ocorre por se aquecer o aço em temperaturas que estão abaixo do limite inferior da zona crítica, para que se aliviem as tensões que foram originadas durante a solidificação ou em operações de

soldagem ou usinagem por exemplo. Em temperaturas acima da ambiente, as tensões começam a ser aliviadas; mas é recomenda-se a realização de aquecimento lento até pelo menos 500° C. Essa temperatura precisa ser a mínima compatível com o tipo e as condições da peça, para não modificar sua estrutura interna, e não alterar suas propriedades mecânicas. (SPECTRU, 2006)

A normalização é feita a fim de reduzir o tamanho de grão do material, e isso é feito pelo controle do aquecimento ou resfriamento relacionado ao teor de carbono do aço, conforme demonstrado na Figura 7. Aços com grãos maiores são mais frágeis devido à sua heterogeneidade. Quando se refina o grão, consegue-se homogeneizar as propriedades e aumentar a tenacidade do aço. A normalização se baseia em aquecer o aço até 60°C acima da zona crítica, para garantir a austenitização total do aço. Após retirar do forno, deixa-se o aço resfriar ao ar naturalmente. Como resultado, obtêm-se pequenos grãos de perlita fina e ferrita. É um tratamento mais barato, devido ao forno poder ser desligado após obter a austenitização do material. (TSCHIPTSCHIN, 2001)

Figura 7 - Relação entre temperatura de aquecimento e resfriamento e teor de carbono ocorrente na normalização



Fonte: TSCHIPTSCHIN, (2001)

Para este trabalho, o objetivo será apenas mudar os tamanhos dos grãos, e não a microestrutura. Para isso, foram feitos ciclos de aquecimento e resfriamento para o controle do tamanho estrutural, por isso os tratamentos indicados foram o recozimento e normalização.

2.7 ENSAIOS MECÂNICOS DESTRUTIVOS

Para determinar e verificar propriedades do aço, ou medir a capacidade de suportar esforço de uma peça, são usados os ensaios mecânicos destrutivos.

O termo destrutivo refere-se à necessidade de procedimentos que inutilizam a peça, ou o corpo de prova, após realizado o ensaio. Alguns ensaios provocam danos menores, como caso do ensaio de dureza. Esses danos, podem não inutilizar a peça, porém se tornam pontos de concentração de tensão, e se tornam locais onde possivelmente ocorrerá alguma falha. Para a realização dos ensaios, geralmente usam-se corpos de prova de um mesmo material, e são seguidas normas específicas, dependendo da peça. (ZOLIN, 2011)

São tipos de ensaios destrutivos: de tração, compressão, dureza, fratura, flexão, torção, fadiga e fluência.

Os ensaios de dureza indicam e comparam os materiais. Identifica-se a resistência do aço à ruptura, ou a capacidade dele se deformar sob tração ou compressão, pela realização do ensaio de dureza.

Dureza é conhecida por ser a resistência ao risco de um material para o outro, ou a resistência à penetração.

2.7.1 Ensaio de Dureza Vickers

É amplamente utilizado, devido a ter uma escala de dureza contínua para uma mesma carga. Com o ensaio de dureza Vickers, é possível avaliar materiais de baixa dureza, valor (5) na escala, até materiais de alta dureza, valor (1500 Hv) na escala dureza Vickers.

O cálculo do valor da dureza Vickers procede de uma relação entre a carga que foi aplicada no ensaio, e a área de impressão no material, sendo essa

impressão na forma piramidal de base quadrada. O penetrador utilizado no ensaio possui uma ponta de diamante com base quadrada e as cargas utilizadas sobre o corpo de prova variam de 10 a 120 Kgf, conforme demonstrado na Figura 8. (ZOLIN, 2011)

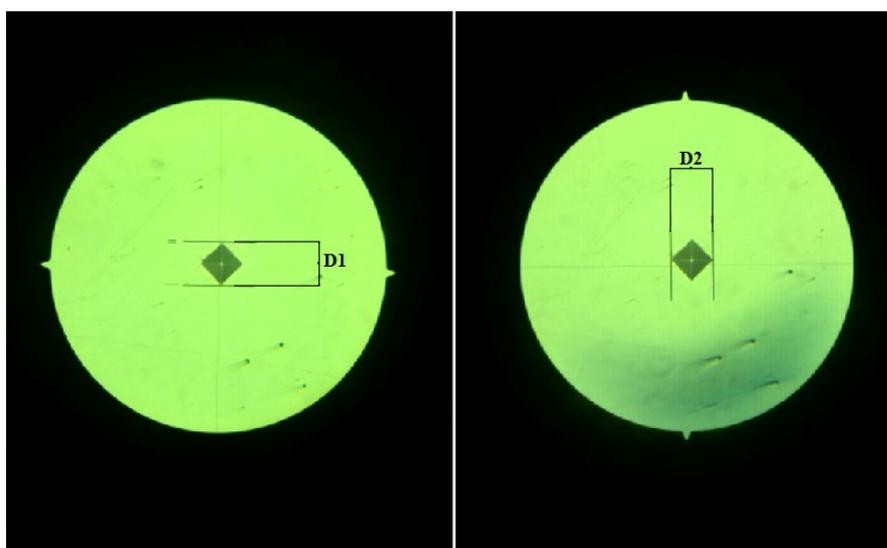
A duração da aplicação de carga plena ocorre num tempo de 10 a 15 segundos. Usando-se um microscópio, medem-se as duas diagonais da endentação, e com esses valores, então se calcula a média aritmética. É necessário também calcular a área da superfície inclinada da endentação (L^2). (NBRNM188-(05/1999))

O resultado pode ser expresso como valor de dureza Vickers (Hv). Para chegar a esse valor, leva-se em conta a carga P , a diagonal de impressão L , e o ângulo de 136° entre as faces opostas do penetrador. O cálculo do Hv consiste em:

$$Hv = \frac{2P \operatorname{sen} \frac{\theta}{2}}{L^2} \quad (5)$$

Para medir o valor de L (medida da diagonal da impressão), usa-se um instrumento de medida de comprimento, com o auxílio de uma luneta, sendo feita a média entre dois valores de medidas das diagonais, conforme demonstrado na Figura 8 a seguir.

Figura 8 - Demonstração do procedimento de obtenção das diagonais para o cálculo de dureza Vickers pelo durômetro.



Fonte: Autoria própria

A norma brasileira para ensaio de dureza Vickers é a NBR-6672. Características próprias deste ensaio é que a escala de carga é contínua, suas impressões são muito pequenas; possui uma escala de dureza única; aplicável a muitos tipos de materiais, e também em qualquer espessura de corpo de prova, na condição de que não tenha nenhuma ocorrência de deformação no lado oposto ao da superfície que for ensaiada. O ensaio de dureza Vickers possui uma utilização industrial limitada, pois o ensaio consome um tempo relativamente grande. Para medição das diagonais, a distância entre a interseção de duas diagonais e a borda do corpo de prova, deve ser de no mínimo $2,5d$. Para a realização do método, inicia-se com a penetração da ponta de teste (diamante), num processo de deformação plástica, para que o resultado possa ser relacionado ao limite de proporcionalidade. A dureza Vickers é um valor numérico na unidade (kgf/mm^2). (TEÓFILO, 2010)

Para o caso deste trabalho, usa-se a dureza Vickers para relacionar as variações do tamanho de grão, com a variação de propriedades mecânicas. Como serão usadas amostras embutidas, esta é a técnica mais indicada para realizar a avaliação.

2.8 ENSAIOS MECÂNICOS NÃO DESTRUTIVOS

Utilizados para avaliar falhas nos materiais. Essas falhas podem ser trincas, inclusões nos cordões de solda, ou variações das propriedades. Essas falhas podem levar à perda de resistência da peça a ser realizada com o material, por isso é necessário averiguar a existência ou não desses defeitos. (ZOLIN, 2011)

Quando se fala em descontinuidades, significa que são falhas que não afetam o funcionamento do equipamento. Um exemplo disso é o que ocorre na fundição, quando alguns vazios estão presentes na estrutura do material, decorrente do processo de fabricação.

Defeitos são quando esses vazios interferem ou podem interferir no funcionamento do material, pois estes agora não se restringem apenas à parte interna da estrutura, mas também podem chegar à superfície, criando assim, pontos de vazamentos. (ZOLIN, 2011)

Os ensaios não destrutivos permitem que se inspecione uma peça antes dela ser utilizada, ou ao longo da sua vida útil, indicando o momento em que a peça precisa ser substituída antes que se rompa em serviço. Esse tipo de ensaio é muito usado nos setores de petróleo/petroquímico, químico, aeroespacial, siderúrgico, naval, eletromecânico, de papel e celulose, entre outros. O método contribui para a manutenção e controle da qualidade dos bens e serviços, reduzir custos, preservar a vida e o meio ambiente, sendo inclusive considerado um fator de competitividade para as empresas que fazem o uso. (ABENDI, 2016)

Os principais métodos de ensaios não destrutivos são: correntes parasitas, emissão acústica, radiografia, radioscopia e gamagrafia, ensaio visual, estanqueidade, líquido penetrante, partículas magnéticas, ultrassom e termografia.

Os pontos positivos, destacados por (GARCIA, 2000) da utilização de ensaios não destrutivos são:

- Pode ser realizado diretamente nos elementos a serem utilizados;
- É possível realizá-lo em todos os elementos de uma estrutura;
- Mais de uma região crítica de uma mesma peça pode ser avaliada de forma simultânea;
- Utilizada na manutenção preventiva;
- Os materiais e as peças, que podem ser de grandes custos de produção, não são perdidos;
- Requer mínima ou nenhuma preparação das amostras;
- Equipamentos costumam ser portáteis, mais baratos e rápidos quando comparados com os ensaios destrutivos.

Porém alguns pontos negativos também são encontrados, como:

- As medições de algumas das propriedades costumam ser indiretas, sendo assim, o comportamento durante a vida útil da peça ensaiada pode não ser devidamente caracterizado;
- Os resultados geralmente são qualitativos e poucas vezes quantitativos;
- Para interpretar as indicações dos ensaios, necessita-se de experiência prévia.

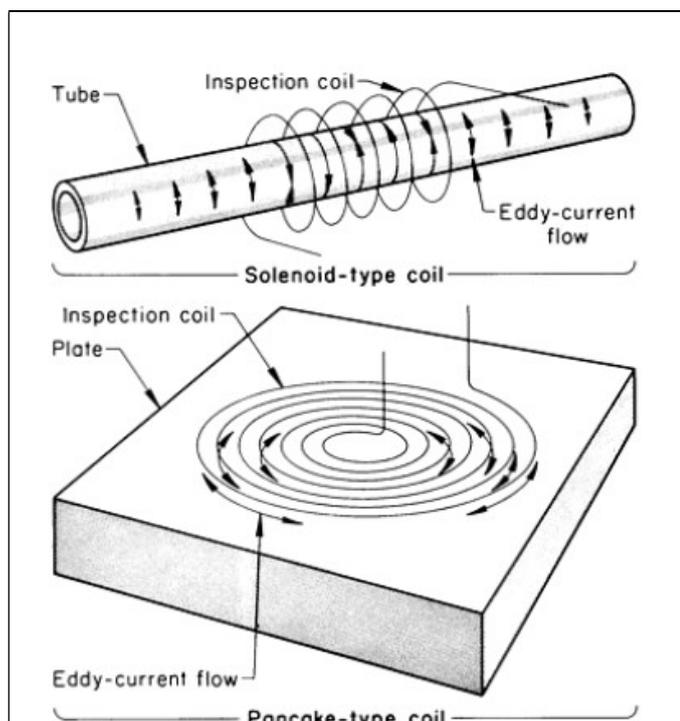
2.8.1 Ensaios Não Destrutivos – Correntes Parasitas

Para o ensaio por correntes parasitas, usam-se correntes elétricas sob um campo magnético variável. A partir dessas correntes, é possível detectar e analisar falhas ou descontinuidades presentes no aço. O método se baseia na interação desses campos magnéticos, que foram descobertos em 1831 por Michel Faraday, que descobriu a indução eletromagnética. (Mix, 2005)

Por meio de indução eletromagnética, a variação do campo magnético gera correntes, que quando atravessam uma massa metálica, no caso o aço SAE 1045, aumenta a temperatura da amostra. O ensaio por correntes parasitas consiste em analisar estas correntes, sendo uma técnica que inspeciona o material sem danificá-lo.

A Figura 9 a seguir, exemplifica o funcionamento deste tipo de ensaio.

Figura 9 - Princípio de funcionamento por correntes parasitas



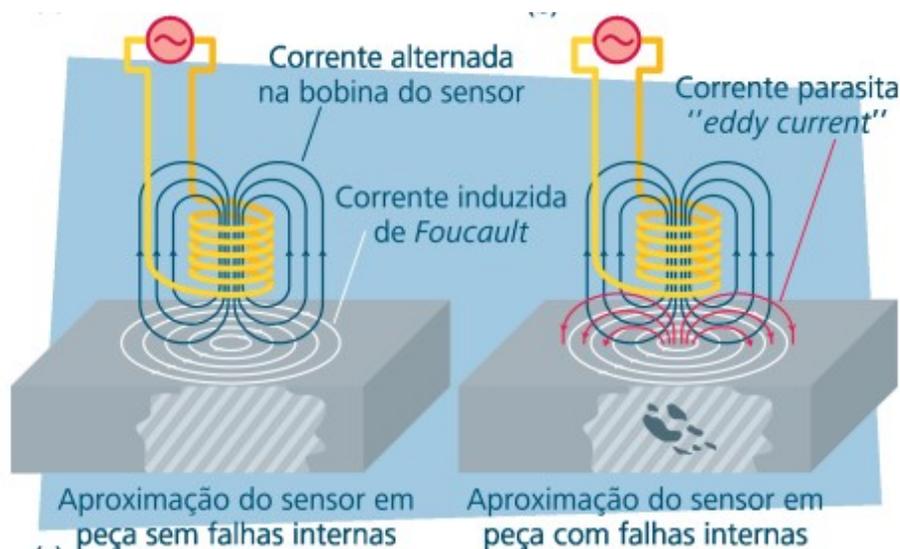
Fonte: ASM Metals Handbook (1989)

O objetivo desse ensaio é diferenciar as condições físicas, metalúrgicas e estruturais nos metais ferromagnéticos, podendo medir propriedades como condutividade elétrica, tamanho de grão, dureza, identificar diferenças na

composição, localizar variações associadas à condutividade do material, além de verificar descontinuidades, rachaduras, inclusões e espaços vazios na estrutura do material. (ASM Metals Handbook ,1989)

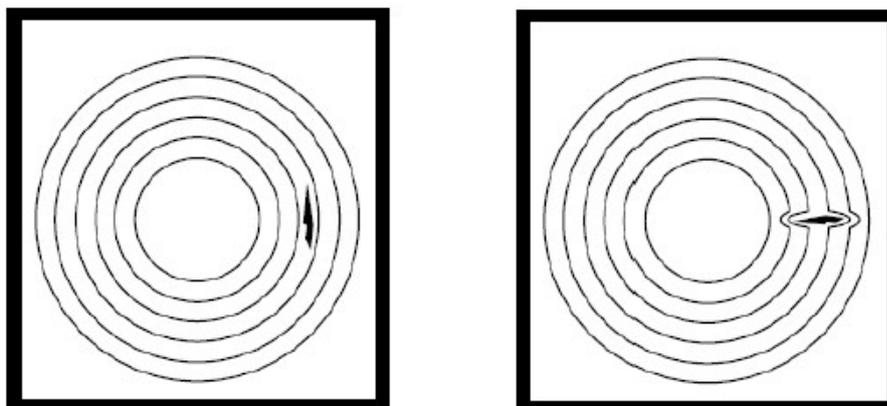
Com o fluxo magnético, gera-se a corrente elétrica, e isso afeta a impedância da bobina que gerou a corrente. Ocorrendo variações no fluxo das correntes parasitas que estão sobre a peça, resultará na variação dessa medida da impedância, que é a capacidade de resposta de um circuito elétrico percorrido por uma corrente alternada. Por serem possíveis variações dessa medida, usa-se isso como método de ensaio com o objetivo de identificar e localizar descontinuidades presentes em uma peça que passa pelo ensaio. As correntes parasitas têm seus fluxos interrompidos pelas possíveis falhas. Variando a medida de impedância da bobina utilizada no ensaio (Figura 10), é possível analisar o tipo de defeito. (ZOLIN, 2011)

Figura 10 - Princípio de detecção por correntes parasitas



Fonte: Zolin (2011)

Para verificação das descontinuidades são analisadas as perturbações do fluxo das correntes parasitas. Uma descontinuidade apresentará menor percepção, quando a sua maior dimensão estiver disposta no sentido paralelo ao caminho do fluxo das correntes (Figura 11). A descontinuidade será mais perceptível quando sua dimensão for maior no sentido perpendicular ao trajeto do fluxo. (HELLIER, 2003)

Figura 11 - Posições das descontinuidades

Fonte: Hellier (2003)

Para que se identifique o problema, é utilizado o tratamento eletrônico e análise dos sinais, usando aparelhos específicos (Figura 12) que permitirão o inspetor avaliar e encontrar o problema. Para esse tipo de teste, utilizam-se bobinas, que possuem formas como, por exemplo, a cilíndrica que pode ser comparada a uma caneta. Esta possui um sensor, e com ele, é possível por passá-lo sobre o material, identificar as trincas e as descontinuidades na superfície. As bobinas de forma circular, quadrada ou oval são as que possibilitam a passagem da peça, e por meio delas consegue-se analisar além das descontinuidades, pois também é possível indentificar variações físico-químicas da peça. A aplicação desse tipo de ensaio é para metálicos ferromagnéticos. Na indústria é aplicado em inspeção de tubos de combustíveis e energia nuclear, plantas petroquímicas, sistemas de condicionamento de ar, inspeção de estruturas aeroespaciais, testes de produção de tubos, canos e fios, dentre outros. (HELLIER, 2003)

Figura 12 - Exemplo de equipamento utilizado em ensaio por correntes parasitas com gráfico formado no visor do aparelho detector.



Fonte: Polimeter (2012)

Feito o procedimento do ensaio, os resultados são mostrados na tela (Figura 12), exigindo do operador tenha experiência prévia para que ocorra uma boa compreensão dos dados obtidos.

Algumas vantagens do ensaio por correntes parasitas estão em ser um ensaio rápido, limpo, com baixo custo operacional, e com automatização do processo de inspeção. Além disso, têm-se a possibilidade de ensaiar produtos siderúrgicos diretamente, mesmo em altas temperaturas. O procedimento não oferece risco algum ao operador e ao processo. (ZOLIN, 2011)

Porém, existem alguns pontos críticos na utilização do ensaio por correntes parasitas. Exemplos de desvantagens são que as técnicas irão variar de acordo com o material ensaiado, com o modo manual ou automático que será feito o ensaio, com o tipo das falhas que se deseja verificar, e suas respectivas localizações.

A maior limitação dos ensaios por correntes parasitas é que somente materiais eletricamente condutores podem ser inspecionados. A penetração das correntes parasitas tem um alcance que pode ser reduzido a milímetro nos materiais de maior condutividade, como o cobre, ligas de alumínio, etc. (ZOLIN, 2011).

Para garantir a qualidade da inspeção, é necessário conhecimento e experiência do operador sobre o procedimento do ensaio, além da necessidade de seguir padrões para calibrar o aparelho segundo as normas.

Nos trabalhos utilizando correntes parasitas, a condutividade é a propriedade do material de maior interesse, sendo a resistência outro elemento de importância. (HELLIER, 2003).

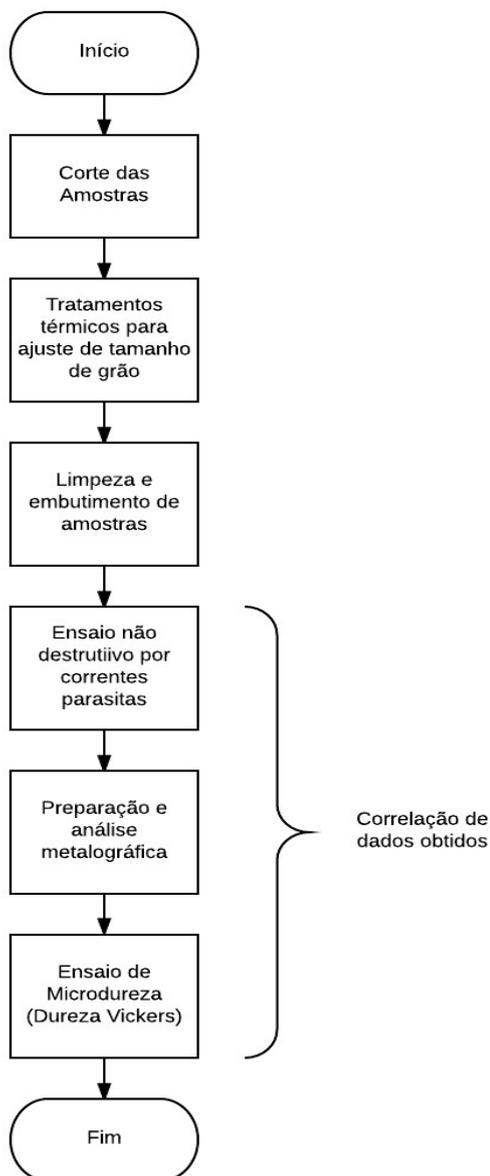
ASM Metals Handbook (1989) cita que todos os materiais possuem características de resistência ao fluxo da eletricidade. Outra propriedade importante é a permeabilidade magnética, que é a tendência do material de mudar as linhas de força do campo magnético. No teste de correntes parasitas, isso pode ser um problema, pois a permeabilidade relativa do aço pode variar durante o teste, gerando sinais de ruído, que podem obstruir os sinais das correntes parasitas (HELLIER, 2003).

Realizou-se a técnica de ensaios por correntes parasitas para avaliar a variação do ângulo da resistividade, que será medida por meio do ensaio. Após isso, foi feita a comparação com os diferentes tamanhos de grãos determinados por normas técnicas, usando microscópicos óticos.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia que será utilizada para o estudo da relação entre a resistividade do aço e seu tamanho de grão será apresentada nesse tópico, juntamente com os equipamentos e materiais que serão utilizados nos laboratórios. Para facilitar a compreensão, a Figura 13 a seguir indica os procedimentos a serem executados.

Figura 13 - Fluxograma do Procedimento Experimental



Fonte: Autoria Própria

3.1 OBTENÇÃO DA AMOSTRA

Foram utilizadas 12 amostras do aço 1045, com tamanhos de grãos diferentes, com as dimensões de acordo com o material disponível no departamento acadêmico de mecânica. Para o corte das amostras, foi utilizada

uma cortadeira metalográfica da marca Solotes, modelo Maxicut disponível no laboratório de caracterização de materiais (UTFPR – Campus Ponta Grossa).

3.2 TRATAMENTO TÉRMICO

As amostras do aço SAE 1045 seccionadas, foram submetidas a quatro ciclos de aquecimento e resfriamento controlados (tratamentos térmicos), com o objetivo de formar quatro diferentes tamanhos de grãos homogeneamente distribuídos.

O primeiro tratamento térmico realizado objetiva a obtenção de granulometria grosseira (tamanho de grão grande) nas amostras tratadas. Para isso foi feito o recozimento, por se aquecer todas as amostras em temperatura de 900°C por 30 minutos, para garantir a austenitização do aço e deixá-las resfriando dentro do forno até chegarem à temperatura ambiente. É desejável somente a obtenção de fase austenita.

Feito isso, foi realizado outro tratamento térmico, com objetivo de refinar e homogeneizar a microestrutura. A metodologia deste tratamento está descrita a seguir:

- I. Inicialmente, foi realizado o aquecimento da amostra no forno (mufla marca Jung). Elevou-se a temperatura até 900°C, durante o tempo de 20 minutos.
- II. Em seguida, após desligar o forno, o resfriamento foi realizado em ambiente de forno, deixando a amostra resfriar lentamente até atingir a temperatura ambiente.

O segundo tratamento térmico foi o de normalização com resfriamento em ar calmo, seguindo a mesma metodologia de aquecimento para austenitização, explanada anteriormente.

- I. Feito o recozimento, prosseguiu-se para a normalização. Novamente, foi elevada a temperatura do forno para 900°C. Deixou-se a amostra aquecer por 20 minutos.
- II. Realizado o aquecimento, a amostra foi então retirada de dentro do forno, e deixada resfriar em temperatura ambiente.

O terceiro tratamento térmico (normalização com resfriamento sob ar forçado) seguiu a seguinte metodologia:

- I. Feito o recozimento, prosseguiu-se para a normalização. Novamente, foi elevada a temperatura do forno para 900°, e deixou-se a amostra aquecer por 20 minutos.
- II. Realizado o aquecimento, a amostra foi retirada de dentro do forno, e deixada resfriar ao ar forçado com a utilização de um ventilador.

O quarto tratamento térmico (resfriamento em água) seguiu a metodologia a seguir

- I. Feito o recozimento, prosseguiu-se para a normalização. Novamente, elevou-se a temperatura do forno para 900°, e deixou-se a amostra aquecer por 20 minutos.
- II. Realizado o aquecimento, a amostra foi retirada de dentro do forno, e deixada resfriar em um recipiente com água a temperatura ambiente.

A Tabela 3 mostra a distribuição das amostras que foram analisadas e os tratamentos térmicos que cada uma foi submetida.

Tabela 3 - Divisão de amostras para realização do tratamento térmico

QUANTIDADE DE AMOSTRAS	TRATAMENTOS TÉRMICOS APLICADOS
3 AMOSTRAS	RECOZIMENTO E RESFRIAMENTO NO INTERIOR DO FORNO (GRUPO A)
3 AMOSTRAS	RECOZIMENTO E RESFRIAMENTO EM TEMPERATURA AMBIENTE (GRUPO B)
3 AMOSTRAS	RECOZIMENTO E RESFRIAMENTO COM AR FORÇADO (GRUPO C)
3 AMOSTRAS	RECOZIMENTO E RESFRIAMENTO EM ÁGUA (GRUPO D)

Fonte: Autoria Própria

3.3 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

Para que a amostra seja analisada, após o corte foi necessário fazer embutimento a quente com baquelite, utilizando o equipamento: embutidora manual Maxi Press Metalotest. (Figura 14).

Figura 14 – Embutidora Manual Maxi Press Metalotest



Fonte: Autoria Própria

Feito isso, iniciou-se a preparação da superfície a ser analisada microscopicamente. Primeiramente, foi realizado o lixamento, para remover deformações do material vindas da etapa de corte, e assim obteve-se uma superfície plana e sem defeitos.

Para o lixamento das amostras, foi utilizada a politriz Arotec (Figura 15). As lixas utilizadas tinham granulometria de 200, 300, 400, 600 e 1200 grãos/pol².

Após realizar o lixamento, fez-se o polimento das amostras utilizando o método de suspensão de alumina com 1 μm e 0,3 μm .

Figura 15 - Lixadeira e Politriz Arotec



Fonte: Autoria Própria

Finalizados esses procedimentos, foi realizada a revelação da microestrutura utilizando o reativo Nital, uma mistura de 2% de ácido nítrico em álcool etílico. A revelação foi interrompida com água, seguida de lavagem em álcool. Após isso secou-se a superfície preparada com ar quente.

A figura 16 apresenta a amostra após o embutimento, lixamento e polimento.

Figura 16 - Amostra após preparação



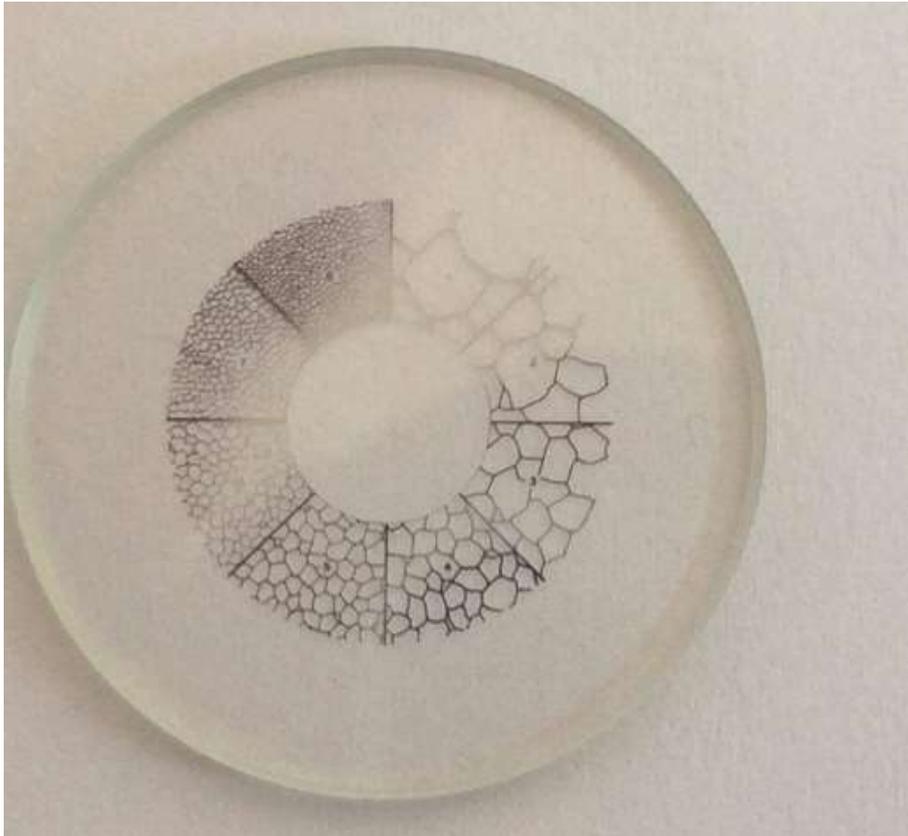
Fonte: Autoria Própria

3.3.1 Metodologia do Ensaio de Microscopia Ótica

Este ensaio é realizado para obtenção da estrutura das amostras e verificar a microestrutura de cada amostra após a realização do tratamento térmico.

Foi utilizado um microscópio marca Olympus, modelo BX60. Foram realizados os ajustes no equipamento, e após isso, analisadas as superfícies das amostras. Todo o procedimento foi realizado por ampliar a imagem da superfície da amostra em 100 vezes, com a utilização do software AnalySIS©. Para a medida dos tamanhos de grão, utilizou-se um reticulado na ocular direita, seguindo o padrão da norma ASTM E112 (Com a obtenção da imagem, e a utilização do reticulado, comparou-se o tamanho do grão observado no microscópio com os tamanhos de grão indicados no reticulado e determinou-se o tamanho de grão médio de cada uma das amostras tratadas termicamente). A Figura 17 mostra o reticulado utilizado como padrão de identificação dos tamanhos de grão.

Figura 17 - Reticulado utilizado para classificar o tamanho de grãos do aço 1045



Fonte: Autoria Própria

3.4 ENSAIOS POR CORRENTES PARASITAS

A finalidade do ensaios por correntes parasitas neste trabalho é obter as curvas de classificação da resistividade de cada uma das amostras preparadas. Foram feitas as medições de ângulo de fase dessas curvas de resistividade para que se obtivesse a relação entre esta e o tamanho de grão.

3.4.1 Equipamentos Utilizados

Como equipamento de correntes parasitas, utilizou-se o modelo Olympus Nortec® 500 d, conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18 - Equipamento Olympus Nortec 500 D



Fonte: Autoria Própria

Para a realização do ensaio, foram utilizados também outros componentes, como a sonda de superfície Nortec PowerLink 300Hz-10kHz e os Padrões de Condutividade Nortec, conforme a Figura 19 a seguir.

Figura 19 - Sondas utilizadas para o ensaio por correntes parasitas



Fonte: Aatoria Própria

3.4.2 Metodologia do Ensaio por Correntes Parasitas

Os passos necessários para a execução do ensaio são descritos a seguir, conforme a instrução de trabalho a seguir (IANKE, 2016):

I. Conectou-se a sonda ao equipamento e pressionou-se a tecla programável LOG/ENTER para que se confirme quando aparecer a tela do PowerLink™. Após isso, foi preciso pressionar a tecla de função MAIN a fim de que se passasse para a configuração do teste.

II. Pressionou-se a tecla programável FREQ 1 e foi então girado o SmartKnob™ até 25 kHz para que se definisse o valor de frequência (FREQ).

III. Pressionou-se a tecla programável ANGLE e foi girado o SmartKnob™ até 169.0° para que se definisse o valor do ângulo da curva (ANGLE).

IV. Pressionou-se a tecla programável GAIN e foi girado o SmartKnob™ até que 62dB apareça tanto no quadrado H GAIN quanto no V GAIN. Para algum ajuste de precisão necessário, modificou-se GAIN e ANGLE .

IV. Ajustou-se a posição horizontal. Para isso, foi pressionada a tecla de função DISP, e logo em seguida a tecla programável SCREEN SETUP. Feito isso, foi pressionada a tecla programável H POS e então girado o SmartKnob™.

V. Ajustou-se a posição vertical. Para isto foi pressionada a tecla de função DISP, e em seguida a tecla programável SCREEN SETUP. Na sequência, foi pressionada a tecla programável H POS e então girado o SmartKnob™.

VI. Para limpar a tela, pressionou-se NULL.

Após realizar todos esses ajustes, habilitando o equipamento para o ensaio, foi colocada a sonda sobre a superfície de cada amostras e então realizada uma comparação visual das curvas dos ângulos de fase por meio da tela.

Esperou-se por meio disso, ver na tela um gráfico que evidencia a variação da impedância devida à diferença de resistividade na amostra em relação à variação dos tamanhos de grãos, lembrando que no eixo das abscissas têm-se a resistência elétrica e no eixo das ordenadas tem a reatância indutiva. Ambas são geradas por meio de uma resposta da amostra às correntes que são induzidas no material de ensaio, no caso o aço 1045.

Foram transferidas para um computador as imagens por meio de uma conexão USB. As curvas então foram transformadas em retas desde um ponto inicial até o último ponto, com a utilização do software Auto CAD 2014. Obtidas essas retas, realizaram-se as medidas dos ângulos de fase, por meio do equipamento.

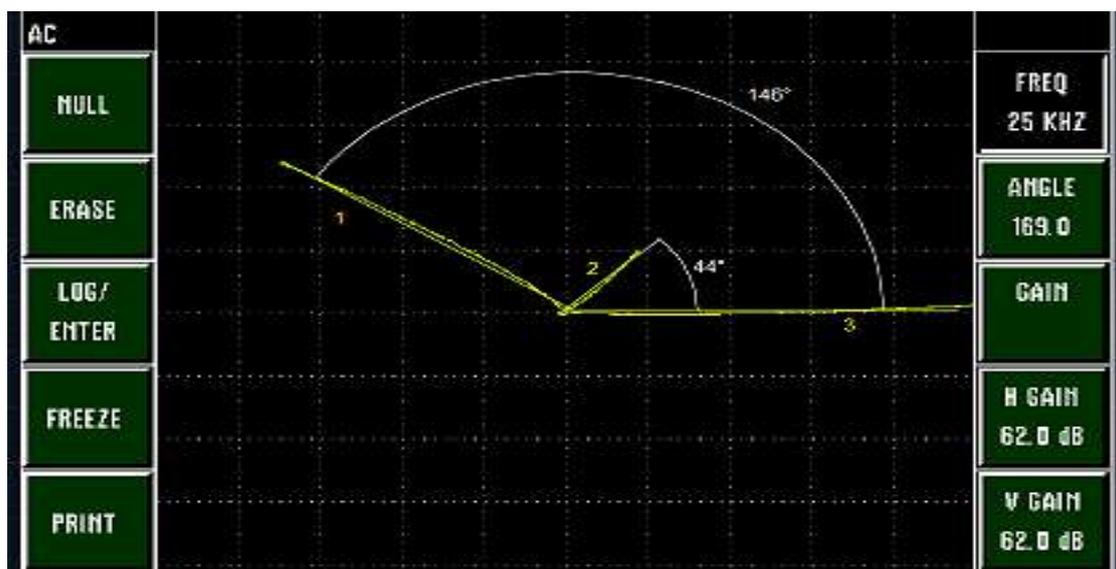
Escolheu-se o método Volts Pico-a-Pico (V_{p-p}), para se medir o ângulo de fase, pois este permite a medição em linha reta entre o ponto de início e fim da curva, independente se esta curva é complexa ou não. (EPRI, 1999)

Para a obtenção das curvas que representam a resistividade elétrica do aço 1045, foi realizado o ensaio por correntes parasitas. E para obter o valor do ângulo de fase, foi utilizado o software AutoCAD 2015.

O ensaio por correntes parasitas foi realizado após as amostras já terem passado por tratamento térmico, e terem sido embutidas, lixadas e os polimentos realizados.

Foram realizados ensaios de correntes parasitas para todas as amostras em três frequências diferentes: 25 50 e 75 kHz para analisar qual das frequências proporcionaria curvas de resistividade elétrica com melhores resultados para comparações em relação ao tamanho de grão e dureza Vickers. A Figura 20 representa a curva de resistividade e ângulos de fase para o aço 1045 na frequência de 25 kHz.

Figura 20 - Curva de Resistividade com frequência de 25 kHz



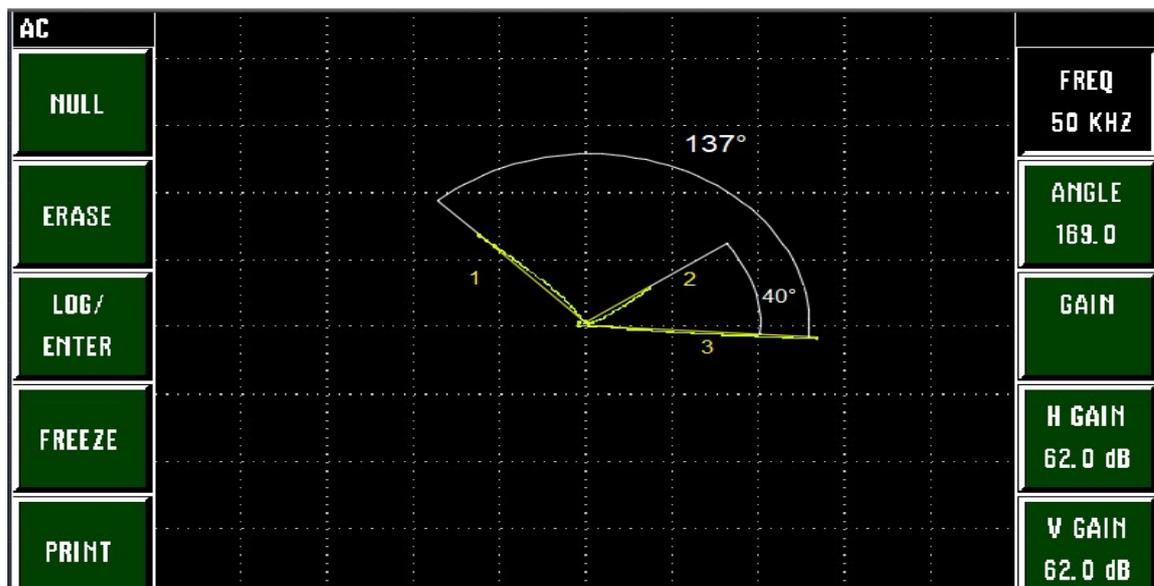
Fonte: Autoria Própria

Foi usado um bloco padrão com 100,3 % IACS para o ensaio. O ângulo de fase é obtido em relação à linha horizontal através do ensaio por correntes para a amostra em questão, e o valor deste ângulo neste caso é de 146° , indicando que a condutividade da amostra é menor que 1,10% IACS, pois o ângulo de 44° representa o ângulo de fase da amostra padrão com 1,10 % IACS.

No estudo realizado por (IANKE, 2016) foi observado que através do ensaio por correntes parasitas uma diminuição do ângulo de fase com o aumento da temperatura de revenimento, resultando num aumento discreto da condutividade elétrica, concluindo-se que à medida que o ângulo de fase diminui, a condutividade elétrica aumenta. É importante lembrar que se uma substância tem uma resistividade elevada, terá uma condutibilidade baixa, e vice-versa. (TECEM, 2005).

A Figura 21 a seguir traz o gráfico referente ao ensaio por correntes parasitas para o aço 1045 com frequência de 50 kHz:

Figura 21 - Curva de Resistividade com frequência de 50 kHz

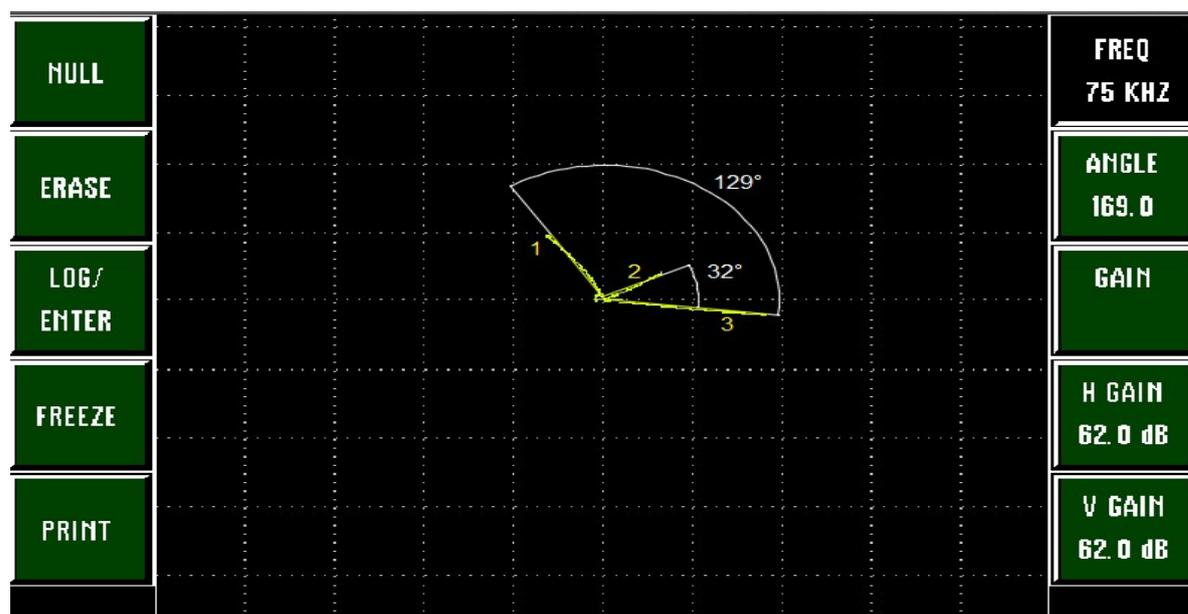


Fonte: Autoria Própria

Neste ensaio (Figura 21), obteve-se o ângulo de 137° em relação à horizontal, indicando que a resistividade quantificada é maior quando se aumenta a frequência usada no ensaio, e ainda conclui-se que quanto maior o ângulo da curva de resistividade, menor será a % IACS, que representa a condutividade, e sabendo-se que a condutividade é o inverso da resistividade, conclui-se que quanto maior o ângulo, maior será o valor da resistividade.

A Figura 22 ilustra o gráfico referente ao ensaio por correntes parasitas para o aço 1045 com frequência de 75 kHz:

Figura 22 - Curva de Resistividade com frequência de 75 kHz



Fonte: Autoria Própria

Conclui-se então, que ao diminuir a frequência do ensaio, implica num maior ângulo de fase e um maior valor de resistividade.

3.5 METODOLOGIA DO ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

Como equipamento, foi utilizado o Durômetro Vickers para medição de dureza Test Force HV 1000 (9,807 N), da marca Shimadzu, conforme a Figura 23.

Figura 23 - Durômetro Shimadzu



Fonte: Autoria Própria

Para executar o ensaio foram seguidos os seguintes passos:

- I. Definição dos pontos que irão ser medidos na superfície da amostra
- II. Realização da configuração do equipamento
- III. Amostra posicionada no equipamento
- IV. A tecla de início de ensaio foi pressionada no local onde foram feitas as marcações usando um penetrador de diamante na forma piramidal. Esta impressão foi feita pela aplicação de uma carga de 300kgf por 15 segundos.
- V. Por meio da lente microscópica do equipamento mediram-se as diagonais da deformação em forma de losango regular obtida pela aplicação da carga de ensaio. Com isso, o valor da dureza foi quantificado pela máquina, e obtiveram-se então os valores de microdureza Vickers.
- VI. Posicionaram-se novamente os outros pontos, e foram realizados os mesmos procedimentos citados para cada um deles.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão apresentados os resultados que foram obtidos durante os ensaios por correntes parasitas, microdureza Vickers, e da preparação e determinação de tamanho de grão por microscopia ótica. Com isso, serão demonstradas as relações entre os resultados obtidos, verificando-se como a curva de resistividade elétrica gerada pelo ensaio de correntes parasitas está relacionada com o tamanho de grão.

4.1 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

Para a realização dos ensaios de microdureza foram realizadas identificações em diversos pontos ao longo da superfície das amostras, estabelecendo distâncias entre as identificações para que uma não comprometesse a outra, e tendo como objetivo determinar a variação da dureza e obter um valor médio de microdureza Vickers para cada amostra. Os ensaios de microdureza foram realizados após as amostras já terem passado por tratamento térmico, e terem sido embutidas, lixadas e os polimentos realizados.

Os resultados obtidos de microdureza Vickers são apresentados na Tabela 4 a seguir:

Tabela 4 - Resultado do teste de microdureza Vickers para amostras tratadas termicamente.

Dureza Vickers (HV) - (HV 0.300 = 2,942 N)						
Amostra	Medição	Medição	Medição	Medição	Medição	MÉDIA
	1	2	3	4	5	
A1	175	169	173	154	166	167,4
A2	163	172	169	158	175	167,4
A3	183	155	174	168	186	173,2
B1	209	201	216	209	220	211
B2	226	211	210	222	210	215,8
B3	220	228	230	240	211	225,8
C1	229	230	230	235	233	231,4
C2	241	240	221	229	239	234
C3	223	231	240	235	242	234,2
D1	566	594	563	545	533	560,2
D2	707	691	700	695	709	700,4
D3	730	742	759	724	751	741,2

Fonte: Autoria Própria

Pode-se notar um agrupamento das amostras que passaram pelos mesmos tratamentos térmicos e mesmos métodos de resfriamento, pelos valores de microdureza. As amostras do grupo A possuem os menores valores de dureza, pois passaram pelos tratamentos de revenimento com resfriamento dentro do forno, que é um resfriamento lento e que proporciona melhor ductilidade, melhores características de usinabilidade e menor dureza; as amostras do grupo B e grupo C tiveram valores de microdureza um pouco maiores, porém muito próximos mesmo considerando resfriamento por ar forçado aplicado nas amostras do grupo C.

As amostras do grupo D possuem os maiores valores de dureza, por terem passado aquecimento seguido de resfriamento a água, com maior velocidade de resfriamento, o que implicou em maiores valores de microdureza e provavelmente menores tamanhos de grãos.

4.2 DETERMINAÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO POR MICROSCOPIA ÓTICA

Para a obtenção do tamanho de grão das microestruturas obtidas após os tratamentos térmicos foi realizada a medição de tamanho de grão, com o reticulado padrão da norma ASTM E112 (Figura 17), de todas as amostras, e os tamanhos de grãos obtidos estão apresentados na Tabela 5 a seguir:

Tabela 5 - Tamanho de grão das amostras após a realização dos tratamentos térmicos

Amostra	Tamanho de Grão
A1	5
A2	4 – 5
A3	4 – 5
B1	5
B2	4 -5
B3	5
C1	6
C2	5-6
C3	5
D1	5-6
D2	7
D3	6

Fonte: Autoria Própria

Os resultados apresentam valores de tamanhos de grãos bem semelhantes para as amostras dos grupos A e B. Em todos os grupos pode-se detectar presença de ferrita e perlita, e no grupo D onde teve tratamento de têmpera ocorreu a formação de martensita também, mas misturada com ferrita e perlita, explicando-se assim o motivo de tamanhos de grãos tão semelhantes. As amostras que apresentaram maiores valores são as amostras do grupo C e D, sendo que a amostra D2 foi a que apresentou tamanho de grão mais refinado entre todas as amostras por ser parte do grupo D, que foi o que teve maior velocidade de resfriamento, o que resulta em menores tamanhos de grãos.

Os diferentes métodos de resfriamento, não ficaram evidenciados observando-se apenas os valores de tamanho de grão. Sendo necessária a observação também dos resultados obtidos por microdureza Vickers.

Porém nota-se uma relação desses valores de tamanho de grão com os valores de resistividade, conforme os gráficos apresentados no item a seguir.

4.3 ENSAIO DE CORRENTES PARASITAS

Foram feitos para todas as amostras, ensaios de correntes parasitas em frequências de 25, 50 e 75 kV, e os resultados são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Ângulos de fase para diferentes valores de frequência do ensaio

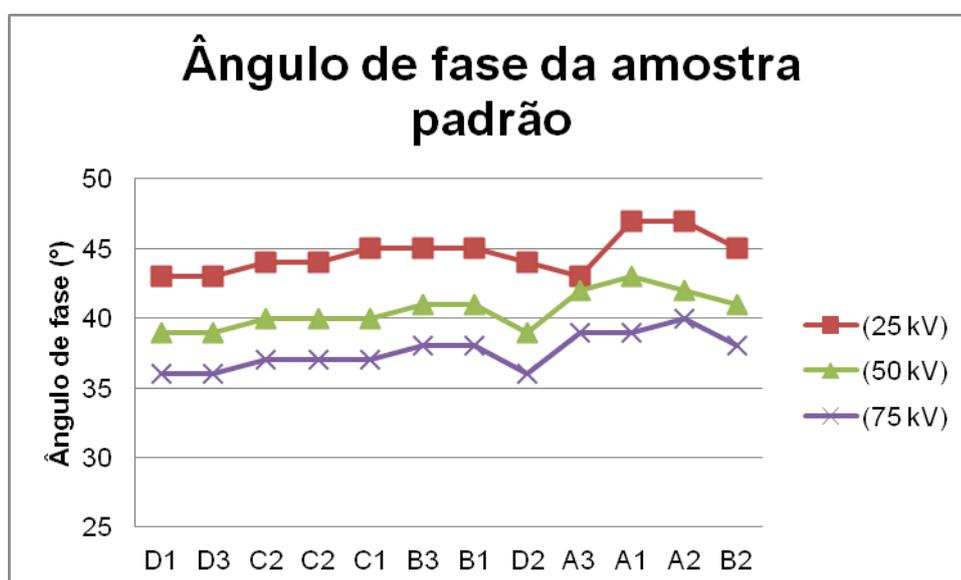
Ângulo de Fase (°)						
	25 kV / 169°		50 kV / 169°		75 kV / 169°	
Amostra	Amostra Padrão	Amostra em Análise	Amostra Padrão	Amostra em Análise	Amostra Padrão	Amostra em Análise
A1	47	147	43	143	39	137
A2	47	147	42	142	40	139
A3	43	148	42	142	39	137
B1	45	145	41	138	38	133
B2	45	145	41	138	38	133
B3	45	145	41	138	38	133
C1	45	144	40	137	37	132
C2	44	144	40	137	37	132
C3	44	144	40	137	37	132
D1	43	143	39	136	36	131
D2	44	143	39	136	36	131
D3	43	143	39	136	36	131

Fonte: Autoria Própria

Nota-se que com o aumento da frequência, apenas aumentaram-se os valores dos ângulos, e já se consegue diferenciar alguns grupos de amostras, conforme os Gráficos 1, 2 e 3.

O Gráfico 1 indicado pelo ensaio de correntes parasitas, indica os valores de medições do ângulo entre as linhas (2-3), que indica o ângulo de fase da amostra padrão 100,3% IACS. Nota-se que aumentando a frequência do ensaio, diminui-se o valor do ângulo de fase, e conseqüentemente, menor será a resistividade elétrica.

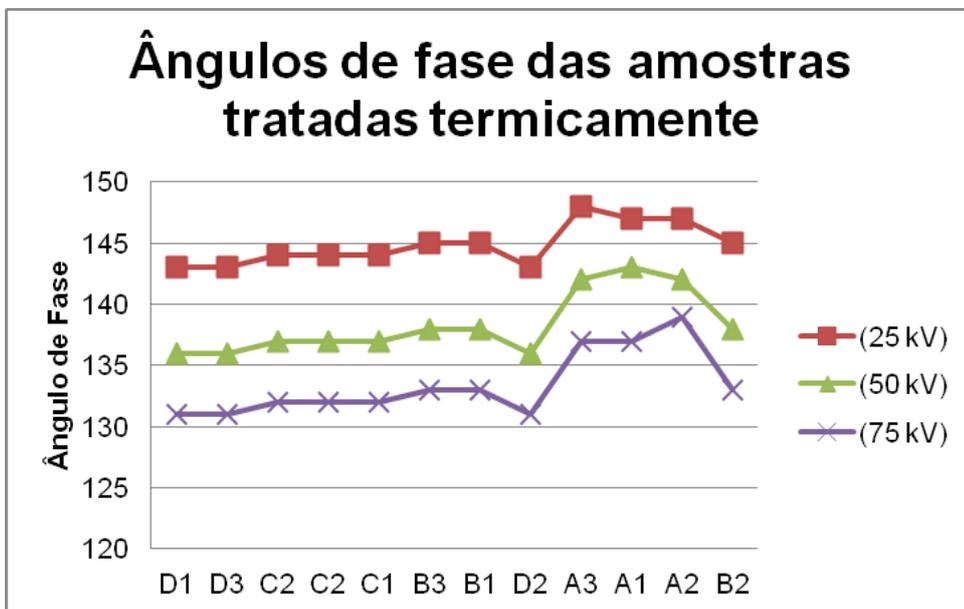
Gráfico 1 - Relação do Ângulo de Fase da Amostra Padrão com a Variação da Frequência no Ensaio por Correntes Parasitas



Fonte: Autoria Própria

O Gráfico 2, apresenta os ângulos de fase das amostras tratadas termicamente, fornecidos pelo ensaio de correntes parasitas. Foi medido o ângulo entre as linhas (1-3), e nota-se que aumentando a frequência do ensaio, diminui-se o valor do ângulo de fase, e conseqüentemente, menor é a resistividade elétrica.

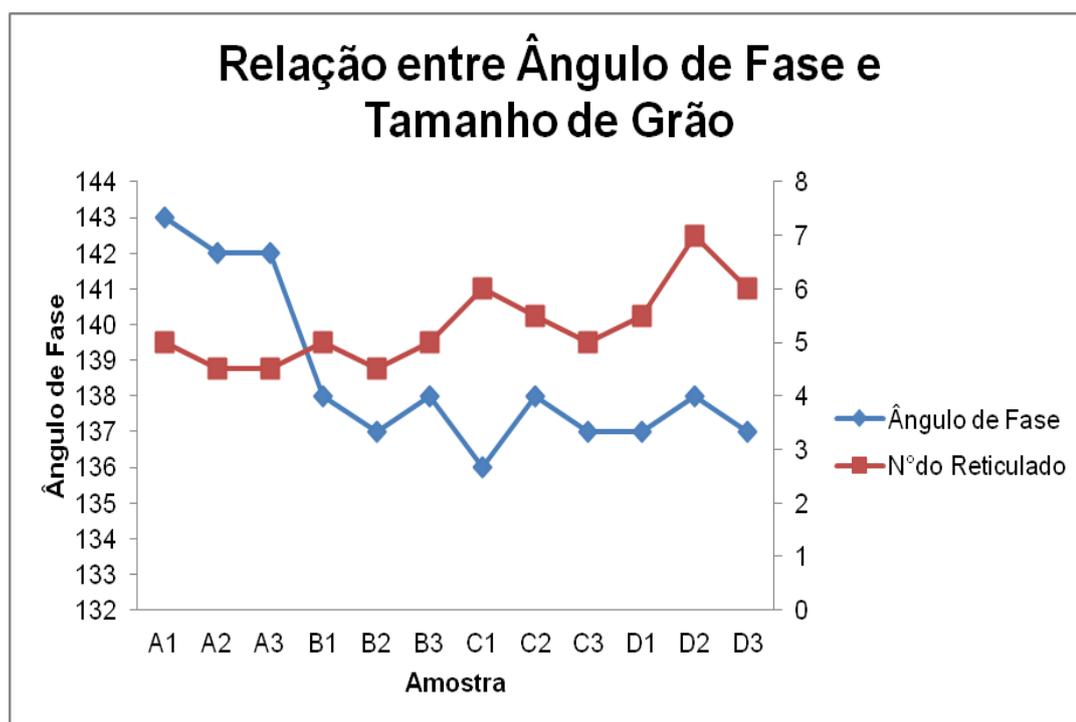
Gráfico 2 - Relação dos Ângulos de Fase das Amostras Tratadas Termicamente com a Variação da Frequência no Ensaio por Correntes Parasitas



Fonte: Autoria Própria

Se observarmos o reticulado utilizado para medição do tamanho médio de grão (Figura 17), e lembrarmos que quanto maior o número do articulado menor é o tamanho do grão, as análises do Gráfico 3 mostram que: quanto menor o tamanho de grão, menores são os valores de ângulo de fase, e consequentemente, menores são os valores de resistividades, estabelecendo assim uma relação proporcional, onde quanto maior o tamanho de grão, maior a resistividade elétrica do material.

Gráfico 3 - Relação do tamanho de grão com resistividade elétrica do aço 1045



Fonte: Autoria Própria

Com isso, alcança-se o objetivo deste trabalho, e é estabelecida a relação entre tamanho de grão, variação do ângulo de fase e resistividade elétrica do aço 1045.

5 CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou que é possível estimar o tamanho de grão com o ensaio não destrutivo por correntes parasitas, analisando a resistividade elétrica por meio dos valores dos ângulos de fase, apresentados durante o ensaio.

O ensaio mostrou-se sensível às mudanças de tamanhos de grão no aço estudado, devido às variações nas velocidades de resfriamento dos tratamentos térmicos realizados.

Por meio desta técnica, observou-se a tendência de comportamento podendo-se estabelecer uma relação entre a variação de tamanho de grão e a resistividade elétrica: quanto menor o tamanho de grão, menor será o ângulo de fase e menor será o valor da resistividade elétrica do material.

A técnica de ensaio por correntes parasitas é uma técnica mais rápida e de resultado imediato quando comparada à técnica tradicional de medição de tamanho de grão – a metalografia. Por meio deste ensaio não destrutivo, evita-se o dano e comprometimento da peça.

Porém é importante ressaltar que para resultados quantitativos, o ensaio não destrutivo por correntes parasitas mostra-se limitado, pois os resultados apresentados foram qualitativos, sendo observada a tendência de comportamento e comparações com padrões pré-estabelecidos. Para resultados quantitativos, são necessários estudos com maiores quantidades de amostras e em diferentes materiais.

REFERÊNCIAS

ABENDI. **Ensaaios Não Destrutivos e Inspeção**. 2016. Disponível em: <<http://www.abendi.org.br/abendi/default.aspx?mn=709&c=17&s=&friendly;=>>. Acesso em: 04 nov. 2016

AÇOSPORT. **Aço SAE 1045**. 2016. Disponível em: <<http://www.acosporte.com.br/aco-sae-1045>>. Acesso em: 06 nov. 2016

ALENCAR, Donizete Anderson de; SILVA JÚNIOR, Silvério Ferreira da. **Estudo das limitações do ensaio não destrutivo por correntes parasitas na avaliação de integridade de tubos em geradores de vapor instalados em usinas nucleares tipo pwr.2002**. Disponível em: <[http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Andre Luiz Formigoni_M.pdf](http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Andre_Luiz_Formigoni_M.pdf)>. Acesso em: 23 set. 2016.

ANDRADE, Luís Cláudio Magnago; HORTA, Marcos Drews Morgado. **Mecânica: Tratamentos Térmicos**. 1997. Disponível em: <<http://www.protolab.com.br/TratamentosTermicos.pdf>>. Acesso em: 06 nov. 2016.

ASM Metals Handbook, vol.17, **Nondestructive evaluation and quality control**, 9a. ed., ASM Int., 1989.

CALLISTER, William D. Jr, **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro:LTC,2006.

CARUSO. **Informações Gerais sobre os Aços**. 2001. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/iyomasa/classificacao-dos-aos>>. Acesso em: 01 nov. 2016.
INDEX <http://indek.com.br/produto/acos-construcao-mecanica-sae-1045/>

DAER, Shimeni Batista Ribeiro; ROLIM, Eva. **A Metalografia quantitativa automática utilizada como ferramenta no controle de qualidade de aços para estruturas metálicas**. 2010. Disponível em: <<http://wwwo.metallica.com.br/a-metalografia-no-controle-de-qualidade-de-acos-para-estruturas-metalicas>>. Acesso

em: 30 out. 2016. TESTMAT <http://www.testmat.com.br/novidades/metalografia-tamanho-de-grao-astm-e112>

GGD, Metals. **Catálogo Técnico Aços e Metais**. 2016. Disponível em: <<http://www.ggdmetals.com.br/wp-content/uploads/2016/01/Construcao-Mecanica.pdf?x56837>>. Acesso em: 05 nov. 2016.

IANKE, Vinícius. **Correlação entre microestrutura e condutividade elétrica, obtida por correntes parasitas, do aço 4340 submetido à têmpera e revenido**. 2016. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2016. Cap. 84.

MENDES, Gustavo Morey. **Separação de Diferentes Composições Químicas de Aço pelo método de Correntes Parasitas: Otimização dos Parâmetros de Ajuste**. 2009. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/18423>>. Acesso em: 23 set. 2016.

MIX, P; **Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide**. 2. ed. New Jersey, 2005.

NBRNM188-(05/1999) **Materiais metálicos - Dureza Vickers** - Parte 1: Medição da dureza Vickers - Parte 2: Calibração de máquinas de medir dureza Vickers - Parte 3: Calibração de blocos padrão a serem usados na calibração de máquinas de medir dureza Vickers

ROSA, Matheus Cassali da. **Protótipo para ensaio não destrutivo utilizando correntes parasitas**. 2015. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/127803/000970319.pdf?sequencia=1>>. Acesso em: 23 set. 2016.

SMITH, William F; HASHEMI, Javad. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. 5. ed. Rio Grande do Sul: AMGH Editora LTDA, 2012.

SPECTRU. **Tratamento Térmico dos aços : Recozimento, Normalização, Têmpera e Revenido**. 2006. Disponível em:

<<http://www.spectru.com.br/Metalurgia/diversos/tratamento.pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2016

SPOERER, Alejandro. **Nova técnica de ensaios por correntes parasitas de tubos com costura durante o processo de fabricação**. 2003. Disponível em: <<http://www.aaende.org.ar/ingles/sitio/biblioteca/material/t-088.pdf>>. Acesso em: 23 set. 2016.

TECEM. **RESISTIVIDADE SPECIFIC RESISTANCE OR RESISTIVITY**. 2016. Disponível em: <<http://www.tecem.com.br/wp-content/uploads/2013/03/EL05-resistencia-especifica-ou-resistividade-tecem.pdf>>. Acesso em: 07 nov. 2016.

TEOFILO, Jorge. **Ensaio Mecânicos dos Materiais**. 2010. Disponível em: <<https://jorgeteofilo.files.wordpress.com/2010/08/epm-apostila-capitulo09-ensaios-mod1.pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2016

TSCHIPTSCHIN, André Paulo. **Tratamento Térmico dos Aços**. 2001. Disponível em: <[http://www.pmt.usp.br/pmt2402/TRATAMENTO TÉRMIICO DE AÇOS.pdf](http://www.pmt.usp.br/pmt2402/TRATAMENTO_TERMICO_DE_AÇOS.pdf)>. Acesso em: 05 nov. 2016

ZOLIN, Ivan. **Ensaio Mecânicos e Análises de Falhas**. 2011. Disponível em: <http://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo_ctrl_proc_indust/tec_autom_ind/ensaios_mec/161012_ens_mec_an_fal.pdf>. Acesso em: 06 nov. 2016.