

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, INOVAÇÃO E
DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO
COORDENADORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
STRICTO SENSU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS

CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA DE AÇO COM A SUPERFÍCIE
ENDURECIDA

GUSTAVO RODRIGUES DA SILVA

Caxias Do Sul, 2010.

GUSTAVO RODRIGUES DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA DE AÇO COM A SUPERFÍCIE
ENDURECIDA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Materiais da Universidade de Caxias do Sul, visando à obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann

Co-orientador: Prof. Dr. Frank Patrick Missell

Caxias do Sul, 2010

GUSTAVO RODRIGUES DA SILVA
CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA DE AÇO COM A SUPERFÍCIE
ENDURECIDA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Materiais da Universidade de Caxias do Sul, visando à obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann

Co-orientador: Prof. Dr. Frank Patrick Missell

DISSERTAÇÃO APROVADA EM TRÊS DE DEZEMBRO DE DOIS MIL E DEZ.

Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann

Prof. Dr. Frank Patrick Missell

Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha

Prof. Dr. Carlos Alejandro Figueroa

Prof. Dr. Gunther J. L. Gerhardt

Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels

AGRADECIMENTOS

Ao professor Rodrigo Panosso Zeilmann, pela orientação, oportunidade oferecida e ensinamentos.

Ao professor Frank Patrick Missell, pela amizade, apoio, incentivo, discussões e ensinamentos. Sua participação e conhecimento em magnetismo e medidas magnéticas foram inestimáveis na execução deste trabalho.

Ao Professor Gunther J. L. Gerhardt, pela ajuda com os cálculos.

Ao colega Ricardo Baiotto, pela amizade, profissionalismo, e ajuda com os equipamentos do LCM.

A bolsista Mariana C. Zanotto, pela ajuda com as medida de dureza.

A minha esposa pela paciência e incentivo.

A universidade de Caxias do Sul (UCS), pela infra-estrutura.

À Empresa Susin Francescutti Metalúrgica Ltda (Sufran), pela colaboração e doação da matéria prima.

A todos que de alguma forma me apoiaram e incentivaram.

ÍNDICE

	Página
AGRADECIMENTOS.....	4
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS.....	11
LISTA DE SIGLAS	12
RESUMO	14
ABSTRACT	15
1 INTRODUÇÃO	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1 NATUREZA MAGNÉTICA DOS MATERIAIS	21
2.2 FERROMAGNETISMO	22
2.3 DOMÍNIOS MAGNÉTICOS E PAREDES DE DOMÍNIO.....	23
2.3.1 Parede de domínios e sua movimentação.....	24
2.3.2 Ancoramento das paredes de domínios.....	25
2.4 SATURAÇÃO MAGNÉTICA	26

2.4.1	Anisotropia magnetocristalina.....	27
2.4.2	Dissipação de energia	28
2.5	CURVA DE HISTERESE.....	30
2.6	DIAGRAMAS DE FASES FERRO-CARBONO	32
2.7	MICROESTRUTURAS DOS AÇOS.....	34
2.7.1	Transformação Austenita – Ferrita.....	34
2.7.2	Transformação Austenita – Cementita.....	35
2.7.3	Formação da Perlita	35
2.8	CURVAS DE TRANSFORMAÇÃO-TEMPO-TEMPERATURA (TTT).....	35
2.8.1	Formação da Martensita.....	36
2.9	TRATAMENTOS TÉRMICOS.....	38
2.9.1	Recozimento.....	38
2.9.2	Normalização.....	38
2.9.3	Têmpera e revenido	39
2.10	TÊMPERA SUPERFICIAL.....	39
2.10.1	Têmpera por indução	40
2.11	DUREZA	41
2.11.1	Teste de Dureza Rockwell.....	42
2.12	MEDIDAS DE RUÍDO BARKHAUSEN.....	42
2.13	RELAÇÃO DA MICROESTRUTURA E O SINAL BARKHAUSEN	44
2.14	EFEITO DA QUANTIDADE DE CARBONO SOBRE O SINAL BARKHAUSEN	46
2.15	RUÍDO BARKHAUSEN PARA MEDIR A ESPESSURA DA CAMADA SUPERFÍCIAL DE AÇOS.....	49
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
3.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	52

3.1.1	Confecção dos anéis (toróides).....	53
3.1.2	Confecção dos cilindros e discos na Sufram.....	54
3.2	MEDIDAS DE DUREZA.....	55
3.3	MEDIDAS COM TRAÇADOR DE CURVAS DE HISTERESE MAGNÉTICA	56
3.3.1	Princípio de funcionamento do TCH.....	57
3.3.2	Ensaio magnético.....	58
3.3.3	Medidas magnéticas nos toróides	59
3.4	RUÍDO BARKHAUSEN	60
3.4.1	Medidas do ruído Barkhausen.....	60
3.4.2	Sistema de medida	61
3.4.3	Sensor.....	63
3.4.4	Filtro.....	64
3.4.5	Cálculos.....	65
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.1	TORÓIDES DE AÇO ABNT 1548.....	67
4.1.1	Medidas de dureza aço ABNT 1548.....	68
4.1.2	Medida de histerese para toróides de aço ABNT 1548.....	68
4.1.3	Medidas de ruído Barkhausen	69
4.2	CILINDROS E DISCOS DE AÇO ABNT 1045 E 1050	71
4.2.1	Medidas de dureza	71
4.2.2	Medidas de ruído Barkhausen	76
5	CONCLUSÃO	82
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

LISTA DE FIGURAS

	Página
figura 2.1 – Demonstração do momento magnético que esta associado com (a) elétron em órbita (b) elétron girando ao redor de seu eixo [22].....	22
figura 2.2 – Configuração de dipolos em um material ferromagnético [22].....	23
figura 2.3 – Representação esquemática de domínios em um material ferromagnético. [22] .	24
figura 2.4 – Estrutura de uma parede de domínio de 180°. [7].....	25
figura 2.5 – Domínios em vários estágios de magnetização [22].....	27
figura 2.6 – Efeito da direção cristalina na magnetização. Adaptado de [7].....	28
figura 2.7 – Energia acumulada no processo de magnetização [24].....	29
figura 2.8 – Energia dissipada e devolvida [24]	29
figura 2.9 – Curva de Histerese [22].....	30
figura 2.10 – Comparação de um material magneticamente duro com um material magneticamente mole [22]	31
figura 2.11 – Diagrama de fases – Ferro-Cementita [28].....	33
figura 2.12 – Mecanismos operantes na decomposição da austenita [28]	34
figura 2.13 – Diagrama TTT para uma liga ferro-carbono com composição eutetóide: A, austenita; B, bainita; M, martensita; P, perlita. [22]	36

figura 2.14 – Efeito do teor de carbono na transformação da austenita em martensita. [29]...	37
figura 2.15 – Têmpera por indução.....	40
figura 2.16 – Sinal de ruído Barkhausen de um dado material [36]	43
figura 2.17 – Tensão relativa (rms) x campo de excitação magnética relativo – (a) Martensita, (b) Martensita Revenida, (c) Perlita Fina e (d) Perlita Grossa. [37]	45
figura 2.18 – Resultado do ruído Barkhausen do (a) aço A e (b) aços B, C e D [35]	48
figura 2.19 – Sinal Barkhausen de peças cilíndricas em aço ferrita-perlita (I), martensítica (II) e temperado superficialmente (III) [39].	50
figura 3.1 – Toróides do aço ABNT 1548.....	53
figura 3.2 – Perfil de dureza (HRC) em aço ABNT 1548, amostra 3-90.....	55
figura 3.3 – Curva de histerese idealizada obtida pelo TCH.....	56
figura 3.4 – Diagrama geral do TCH para o ensaio de pequenas amostras.....	57
figura 3.5 – Curva de histerese $f = 0,2$ Hz (esquerda) e derivada da mesma curva (direita) ...	59
figura 3.6 - Diagrama de blocos do sistema para medir ruído de Barkhausen.....	61
figura 3.7 – Equipamento para medidas de ruído Barkhausen.....	63
figura 3.8 – conjunto yoke/sensor na superfície do cilindro	63
figura 3.9 – Curvatura nas pontas do yoke de ferrite.....	64
figura 3.10 - Filtro passa baixa	65
figura 4.1 – Perfis de dureza aço ABNT 1548, amostra A3.....	68
figura 4.2 – (a) Curva de histerese $f = 0,2$ Hz, (b) derivada da mesma curva, aço ABNT 1548	69
figura 4.3 – Dois picos de ruído Barkhausen em campos magnéticos distintos.....	70
figura 4.4 - Perfis de dureza aço 1045-2-1 ao longo de quatro direções ortogonais	72
figura 4.5 - Perfis de dureza aço 1050 ao longo de quatro direções ortogonais.....	73

figura 4.6 – Medidas de dureza dos discos de aço ABNT 1045 (a) amostra 1045-2-1, (b) amostra 1045-2-2, (c) amostra 1045-2-3, (d) amostra 1045-2-4.	74
figura 4.7 – Medida de dureza dos discos de aço ABNT 1050, (a) amostra 1050-2-1, (b) amostra 1050-2-2, (c) amostra 1050-2-3, (d) amostra 1050-2-4.	75
figura 4.8 – Cilindro de aço ABNT 1045 com quatro regiões endurecidas.....	77
figura 4.9 – Tensão rms do RB nas camadas endurecidas, amostra 1045-2.	77
figura 4.10 – Cilindro de aço ABNT 1050 com quatro regiões endurecidas.....	78
figura 4.11 - Tensão rms do RB nas várias camadas endurecidas, amostra 1050-2.....	79
figura 4.12 – Sinal Barkhausen vs. espessura da camada endurecida, aço ABNT 1045	79
figura 4.13 – Sinal Barkhausen vs. espessura da camada endurecida, aço ABNT 1050	80

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1- Composição dos aços % em peso.....	48
Tabela 2 – Corpos de prova fabricados.....	54
Tabela 3 – Ajustes das curvas de dureza para o aço ABNT 1548.....	68
Tabela 4 – Composição dos aços.....	70
Tabela 5 – Ajustes das curvas de dureza para os discos de aço ABNT 1045 e 1050 amostra 01	71
Tabela 6 - Ajustes das curvas de dureza de um disco de aço 1045-2-1 e um de aço 1050-2-1	73
Tabela 7 – Ajustes das curvas de dureza para os discos de aço ABNT 1045, amostra 2	74
Tabela 8 – Ajustes das curvas de dureza para os discos de aço ABNT 1050, amostra 2	75
Tabela 9 – Ajuste da curva de dureza para o disco de aço 1050-3	76

LISTA DE SIGLAS

A/m	Amper por metro
ABM	Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Corrente Alternada
ARB	Amplitude do ruído Barkhausen
AWG	<i>American wire gauge</i>
B	Indução magnética
Br	Indução magnética residual, remanência, densidade de fluxo remanescente
Bs	Indução magnética de saturação
°C	Grau Celsius
C	Carbono
CCC	Cúbica de corpo centrado
CFC	Cúbica de fases centradas
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnologia
f	Frequência
FAPERGS	Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul
Fe ₃ C	Carboneto de ferro
Fe-C	Ferro-Carbono
GUS	Grupo de Usinagem
H	Campo magnético
Hc	Coercividade
HRC	Rockwell C
Hz	Hertz
KHz	Quilohertz
LCM	Laboratório de Caracterização Magnética
Mf	Fim da formação da martencita
Mi	Início da formação da martensita
RB	Ruído Barkhausen
S	Saturação magnética
SCT	Secretaria de Ciência e Tecnologia
SI	Sistema internacional
T	Tesla
Tc	Temperatura de Curie

TCH	Traçador de curva de histerese
TTT	Transformação tempo-temperatura
Txt	Arquivo texto do sistema Windows
UCS	Universidade de Caxias do Sul
WT%C	Percentual de carbono em peso
μ	Permeabilidade
δ	Distancia de penetração
σ	Condutividade
χ	Susceptibilidade magnética

RESUMO

Neste trabalho foram investigadas as propriedades magnéticas (curva de histerese e ruído Barkhausen) de alguns aços (ABNT 1045, 1050 e 1548) cujas superfícies foram endurecidas por indução. O objetivo era de desenvolver um ensaio não-destrutivo para determinar a espessura da camada endurecida, assim evitando a necessidade de realizar medidas (destrutivas) de microdureza. Medidas da susceptibilidade magnética mostraram um pico (ferrita) em torno de 800 A/m e outro (martensita) em torno de 3500 A/m. Assim procuramos correlacionar a amplitude do pico de ferrita com a espessura da camada dura na superfície. Para esta finalidade foram desenvolvidos sensores para medir ruído Barkhausen e um filtro para o processamento do sinal. Foi possível correlacionar medidas de microdureza com algumas características observadas nas medições magnéticas, como, por exemplo, a amplitude do sinal de ruído Barkhausen e o campo magnético do pico do sinal Barkhausen. Deste modo, encontrou-se uma relação entre a amplitude do ruído Barkhausen e a espessura da camada superficial. Seria desejável complementar essas medidas com outras e sugestões para uma continuação do trabalho são detalhadas.

Palavras-chave: aço-carbono; curva de histerese; ruído Barkhausen; microdureza.

ABSTRACT

This work investigates the magnetic properties (hysteresis loop and Barkhausen noise) in some steels (ABNT 1045, 1050 and 1548) whose surfaces had been hardened by induction. The goal was to develop a non-destructive test procedure to determine the thickness of the hardened layer, thus avoiding the need to perform (destructive) measurements of the microhardness. Measurements of the magnetic susceptibility showed a peak (ferrite) around 800 A / m and other (martensite) at around 3500 A / m. Therefore, a correlation was sought between the peak amplitude of ferrite with the thickness of hard layer on the surface. For this purpose sensors were developed to measure Barkhausen noise as well as a filter for signal processing. It was possible to correlate measurements of microhardness with some features observed in magnetic measurements, for example, the amplitude of the Barkhausen noise and magnetic field of peak Barkhausen signal. Thus, a relationship was found between the amplitude of the Barkhausen noise and the thickness of the surface layer. It would be desirable to supplement these with other measurements and suggestions for further work are detailed.

Keywords: carbon steel; hysteresis curve; Barkhausen noise; microhardness.

1 INTRODUÇÃO

Considerando-se a rápida evolução do nosso ritmo de produção industrial e a constante pressão por melhoria na qualidade, além do óbvio aumento de quantidade vertiginoso, pode-se prever que os ensaios não-destrutivos tornar-se-ão cada vez mais importantes na produção de peças a base de aço (entre muitas outros materiais). Para o aço em particular, investimentos em pesquisa do uso de propriedades magnéticas que tenham este objetivo são, portanto, um passo natural para quem quiser investir em produção competitiva no futuro.

Assim, o Laboratório de Caracterização Magnética (LCM), localizado no bloco G da Universidade de Caxias do Sul (UCS) iniciou, em 2005, os primeiros contatos com o ruído Barkhausen, quando o Professor Frank Missell participou da entrega técnica de um equipamento de medida de tensões residuais através do ruído Barkhausen (RB) na empresa Susin Francescutti Metalúrgica Ltda (Sufran), em Caxias do Sul. O grupo do LCM apresentou o seu primeiro trabalho científico sobre caracterização de superfícies na 6th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, que se realizou na Université de Valenciennes et du Hainaut Cambresis em Valenciennes (França), entre os dias 9-10 de julho de 2007 [1]. Neste trabalho foram apresentadas medidas realizadas com equipamento do LCM e com o equipamento existente na Susin. A boa concordância entre os resultados serviu de motivação para outros estudos no laboratório. Apesar dos equipamentos existentes no LCM possuírem ainda limitações, as medidas do RB eram bem aceitáveis e um aluno de graduação, Ricardo Baiotto, acabou por ganhar o Prêmio Destaque do Ano na Iniciação

Científica do CNPq de 2008. No mesmo ano foi iniciada uma parceria com a empresa Sufran objetivando medir a espessura da camada endurecida em superfície de virabrequins. O Professor Gunther J. L. Gerhardt e o aluno Felipe Giroto começaram a fazer parte da equipe em 2009 e outros trabalhos então começaram a ser publicados nesta área. Em julho de 2010 foi apresentado, no congresso internacional da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM) o artigo “Caracterização magnética de aço com a superfície endurecida” [2]. Neste trabalho comparamos resultados magnéticos nos aços AISI 1045, 1050 e 1548 cujas superfícies foram endurecidas por indução e as respectivas medidas de dureza por micro indentação.

Neste ano foi aprovado um projeto junto a Secretaria da Ciência e Tecnologia (SCT) do Estado do Rio Grande do Sul para apoiar medidas da espessura da camada endurecida na superfície de um aço. Com recursos da SCT, equipamentos essenciais estão sendo importados. Apoio adicional virá de um projeto aprovado recentemente pela FAPERGS (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul).

Medidas da espessura da camada endurecida em aços são importantes para o controle da qualidade das peças e do próprio processo de tratamento térmico. A maneira tradicional de proceder envolve medidas de dureza por micro indentação em que endentações são feitas da superfície até o núcleo da peça de forma a determinar o perfil da dureza por micro indentação. Este método é destrutivo e consome tempo. Desta forma outros métodos vêm sendo desenvolvidos, incluindo técnicas eletromagnéticas. Neste trabalho pretendemos utilizar caracterizações magnéticas visando a determinação da espessura de uma camada endurecida na superfície de um aço.

O ruído Barkhausen, descoberto no início do século XX pelo físico alemão Heinrich Barkhausen, era uma evidência de que existia uma organização magnética da matéria, como aquela prevista teoricamente por P. Weiss. Tratava-se de irregularidades na curva de

magnetização de um material. Hoje sabemos que as descontinuidades do processo de magnetização dos materiais ferromagnéticos dão origem ao efeito Barkhausen [3,4,5,]. A aplicação de um campo magnético modifica a microestrutura magnética. Esta alteração na morfologia da microestrutura magnética resulta em deslocamentos das paredes de domínio. Nos seus trajetos, as paredes encontram imperfeições presentes no cristal, tais como lacunas, precipitados e discordâncias [6,7,8,9]. Estes defeitos agem como pontos de ancoragem que impedem o deslocamento da parede. Se o campo aplicado aumenta, a energia trazida pode ser suficiente para soltar a parede, que se desloca rapidamente até o defeito seguinte. A capacidade dos defeitos em desordenar o deslocamento das paredes de domínio está relacionada com sua natureza e seu tamanho. Em geral, as ancoragens mais fortes são dadas pelos defeitos de tamanho equivalentes à espessura de uma parede de domínio. As descontinuidades que ocorrem no processo de magnetização constituem o efeito Barkhausen [7,8] e é natural esperar que, embutida no ruído, esteja uma assinatura da própria microestrutura do material.

A proposta deste estudo é usar esta técnica magnética para determinar diferentes características de aços de duas camadas, ou seja, estudar a sub-superfície de aços com tratamento térmico superficial por indução, visando observar e entender os sinais vindos da sub-superfície e com a análise destes sinais determinar a espessura da camada endurecida.

Medidas de ruído magnético Barkhausen e análises de curvas de histerese tem sido usadas para determinar o estado de tensões residuais em aços [10]. Quando um material ferromagnético é sujeito a um campo magnético variável, mudanças abruptas na indução magnética induzem pulsos de voltagem numa bobina em torno do corpo de prova. Este fenômeno (RB) é sensível à microestrutura do material. Bach et al. [11] e Dubois e Fiset [12] usaram RB para avaliar a espessura de uma camada superficial modificada de um aço. Bach et al. relacionaram a razão entre as alturas de dois picos de RB com a espessura da camada

endurecida. Dubois e Fiset procuraram uma correlação entre a espessura e o espectro integrado de frequências de RB. Estes trabalhos foram criticados [13] por não considerarem as variações na microestrutura da camada endurecida. Vaidyanathan et al. [13] consideraram cuidadosamente a microestrutura da camada endurecida para explicar pequenas variações nas posições de dois picos no espectro de RB. Fizeram também uma correlação das amplitudes dos picos com a espessura da camada modificada. Jiles et al.[14] estudaram a variação com frequência dos picos de RB para identificar a sua origem e comentar as modificações induzidas numa camada superficial por *shot peening*. Uma patente recente [15] também utiliza a integração do sinal RB sobre uma faixa de frequências para tornar mais sensível um método para determinar a espessura da camada endurecida. Moorthy et al.[16] estudaram o efeito de tensões aplicadas sobre os picos de RB para corpos de prova com espessuras endurecidas diferentes. Para o corpo de prova com a camada endurecida mais fina, onde era possível observar dois picos de RB, o pico em baixos campos, proveniente do interior do corpo de prova, era bem mais sensível à tensão aplicada do que o pico em altos campos magnéticos (superficial). As sistemáticas nas variações no comportamento de RB com tensão aplicada indicam uma redistribuição de tensão residual ocorrendo nas regiões próximas e logo abaixo da superfície, devido a deformação plástica constrangida pela presença da camada endurecida.

Além das medidas de RB, curvas de histerese magnética têm sido usadas para determinar a espessura de camadas endurecidas em aço. Por exemplo, Zhang et al.[17] utilizaram medidas da susceptibilidade magnética χ e da indução magnética B para estimar aquela espessura. Eles empregaram um modelo de duas camadas para descrever seu corpo de prova: uma camada uniforme e homogênea de material duro no exterior de um cilindro de material mole, também uniforme e homogênea. Medidas de B concordaram bem com o perfil de dureza por micro indentação. Lo et al.[18] encontraram boa concordância entre grandezas

obtidas da curva de histerese e o perfil da dureza por micro indentação. Johnson et al.[19] investigaram uma idéia básica de todas essas tentativas: a correlação entre o perfil de dureza por micro indentação e o perfil de uma grandeza eletromagnética. Encontraram que a condutividade elétrica e a coercividade magnética seguiram melhor o perfil da dureza por micro indentação. O modelo de duas camadas tem sido usado extensivamente [20] para modelar um outro método para determinar a espessura da camada endurecida: medidas da diferença de potencial ao longo de uma barra para correntes alternadas.

O presente trabalho relata os progressos obtidos até este momento no problema de medir a espessura da camada endurecida na superfície de um aço.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta fundamentação teórica contempla conceitos, funcionamento, modelos e ilustrações de elementos envolvidos na realização do trabalho.

2.1 NATUREZA MAGNÉTICA DOS MATERIAIS

Primeiro, faz-se necessário o conhecimento da origem das propriedades magnéticas nos materiais. A magnetização de saturação dos materiais é uma consequência dos momentos magnéticos que estão associados aos elétrons individuais [21,22].

Cada elétron em um átomo possui um momento magnético que tem sua origem a partir de duas fontes. Uma delas está relacionada ao seu movimento orbital ao redor do núcleo; sendo uma carga em movimento, um elétron pode ser considerado um pequeno circuito de corrente elétrica, que possui um momento magnético ao longo do seu eixo de rotação, como pode ser visto na figura 2.1. Cada elétron também pode ser considerado como se estivesse girando ao redor de um eixo; o outro momento magnético tem sua origem nessa rotação do elétron e está direcionado ao longo do eixo de rotação, como também é mostrado na figura 2.1. Os momentos magnéticos de *spin* podem se orientar em apenas duas direções. Dessa forma, cada elétron em um átomo pode ser considerado como se fosse um pequeno ímã que possui momentos magnéticos, orbitais e de *spin*.

Entretanto, é interessante notar que em cada átomo individual, os momentos orbitais de alguns pares eletrônicos se anulam mutuamente; isso também é válido para os momentos

de *spin*. Por exemplo, o momento de *spin* de um elétron com *spin* para cima irá anular aquele de um elétron com *spin* para baixo (soma vetorial). O momento magnético líquido de um átomo é, portanto, a soma dos momentos magnéticos de cada um dos seus elétrons constituintes, incluindo as contribuições tanto orbitais como de *spin* e levando-se em consideração os cancelamentos de momento.

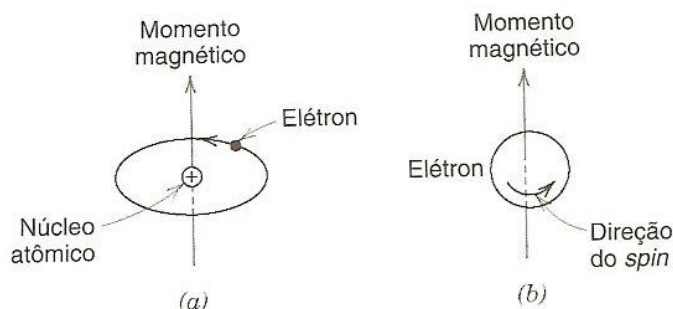


figura 2.1 – Demonstração do momento magnético que esta associado com (a) elétron em órbita (b) elétron girando ao redor de seu eixo [22]

A permeabilidade magnética é uma propriedade de cada material e está relacionada com a magnetização e microestrutura do material, quanto maior sua permeabilidade maior a facilidade de um material ser magnetizado.

2.2 FERROMAGNETISMO

Ferromagnetismo é uma propriedade que permite um alto grau de alinhamento na mesma direção e sentido dos momentos magnéticos [7,23-27]. Alguns materiais metálicos possuem momento magnético na ausência de campo externo, conforme ilustra a figura 2.2. Os materiais ferromagnéticos tem um magnetismo dito ordenado: isto quer dizer que existe uma organização dos momentos magnéticos elementares dos átomos no cristal.

Esta organização, frequentemente chamada microestrutura magnética, é constituída de domínios, nos quais os momentos elementares são todos orientados na mesma direção, separados pelas paredes de domínio [6-9]. Os materiais ferromagnéticos possuem altos

valores de permeabilidade magnética.

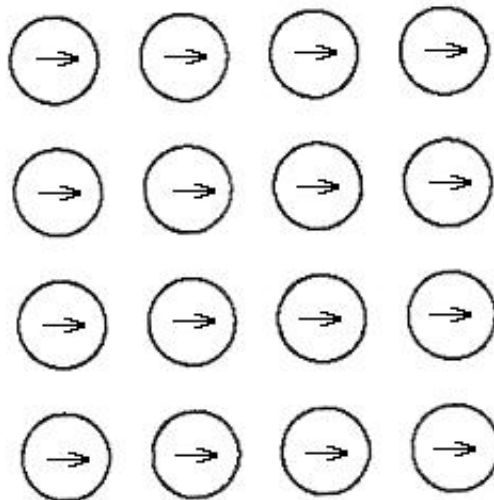


figura 2.2 – Configuração de dipolos em um material ferromagnético [22]

Eles apresentam uma temperatura crítica, denominada temperatura de Curie (T_c), acima da qual perdem o ferromagnetismo e tornam-se paramagnéticos. As temperaturas de Curie variam muito de material para material, por exemplo, ferro (770°C), níquel (358°C), cobalto (1130°C), gadolínio (20°C), SmCo_5 (680°C) e $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (312°C).

2.3 DOMÍNIOS MAGNÉTICOS E PAREDES DE DOMÍNIO

Qualquer material ferromagnético que se encontra a uma temperatura abaixo de T_c é composto por regiões de pequeno volume, onde existe um alinhamento mútuo de todos os momentos dipolo magnéticos na mesma direção, como está ilustrado na figura 2.3. Esta região é denominada domínio magnético, e cada um deles estão magnetizados até a sua magnetização de saturação.

Os domínios adjacentes estão separados por contornos de domínio ou paredes. Em um volume de material ferromagnético no estado desmagnetizado, existirá uma grande quantidade de domínios com orientações aleatórias, onde a somatória das polarizações será nula [22].

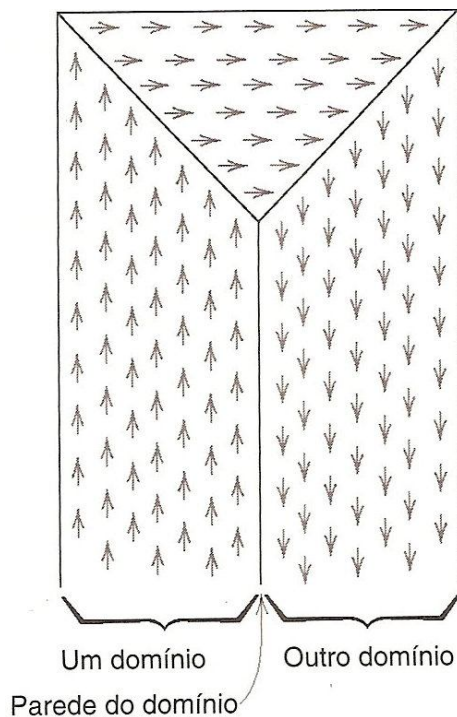


figura 2.3 – Representação esquemática de domínios em um material ferromagnético. [22]

2.3.1 Parede de domínios e sua movimentação

A interface de transição entre diferentes regiões de direções de polarização espontânea caracteriza uma parede de domínios. Na figura 2.4, retirada de [7], está a representação de uma parede de domínios de 180° onde a polarização muda de uma direção para outra gradualmente quando se passa de um domínio ao outro. Deste modo define-se uma espessura.

A energia da parede E_{parede} é determinada pela soma da energia de troca E_{troca} mais a energia de anisotropia magnetocristalina $E_{\text{magnetocristalina}}$.

$$E_{\text{parede}} = E_{\text{troca}} + E_{\text{magnetocristalina}} \quad (1)$$

Naturalmente busca-se uma E_{parede} que tenha um valor mínimo. A E_{troca} atua no sentido de maximizar a largura da parede, contrapondo com a $E_{\text{magnetocristalina}}$. Assim, a somatória da E_{troca} com $E_{\text{magnetocristalina}}$ deve ser mínima.

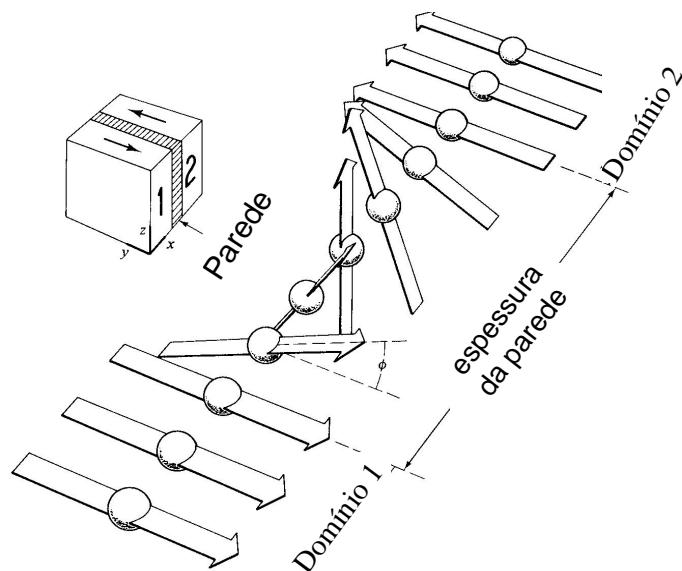


figura 2.4 – Estrutura de uma parede de domínio de 180°. [7]

Um campo magnético externo resultará na rotação do momento magnético atômico dos átomos que pertencem à parede. Para que a energia da parede não aumente, ela deverá se mover.

2.3.2 Ancoramento das paredes de domínios

A movimentação da parede de domínios para a minimização da energia costuma sofrer alguma resistência, isto é, seu movimento não é livre e constante conforme a variação do campo magnético externo é aplicado. Somente no monocristal perfeito a movimentação é livre. Defeitos na microestrutura cristalina do material prejudicam o livre movimento, sendo este fenômeno chamado de ancoramento.

Inclusões, poros, contorno de grão, discordâncias, lacunas, átomos substitucionais, intersticiais são os principais responsáveis, e são conhecidos como centros de aprisionamento de paredes de domínios. À medida que a intensidade do campo magnético externo aumenta, a parede de domínios que teve seu movimento impedido, normalmente consegue ultrapassar este centro de aprisionamento (defeito) e consegue se mover até o próximo centro de aprisionamento que impedirá seu avanço. Deste modo, a movimentação da parede de

domínios ocorre em saltos, conhecidos como saltos de Barkhausen. Ampliando uma curva de histerese de um aço é observado que ela não é lisa e suave, apresentará irregularidades abruptas no valor da magnetização devido a estes saltos [7].

2.4 SATURAÇÃO MAGNÉTICA

Com o aumento da intensidade do campo magnético externo aplicado em um material ferromagnético, sua polarização magnética também irá aumentar, mas de forma não linear. Terá um aumento muito grande no início, depois sua taxa de crescimento diminuirá até um valor de campo magnético onde não mais variará, atingindo a polarização de saturação, a chamada saturação da polarização magnética, ou simplesmente saturação magnética, expressa em tesla (T) no SI. Atinge-se a saturação magnética quando todas as polarizações atômicas estão alinhadas paralelamente na direção do campo magnético aplicado. É considerado como uma propriedade intrínseca do material pois o valor não muda com a quantidade de defeitos cristalinos, nem mesmo se está encruado, ou recozido, por exemplo. O valor de saturação poderá variar dependendo da composição química do material, como no caso dos aços elétricos, onde o aumento da concentração de silício reduzirá o valor da saturação magnética [7]. Na figura 2.5 está um exemplo de uma curva de magnetização até a saturação.

À medida que um campo H é aplicado, os domínios mudam de forma e de tamanho mediante o movimento das paredes de domínio. Essa mudança pode ser observada claramente na figura 2.5, conforme a intensidade do campo H vai aumentando a estrutura dos domínios vai se modificando passando de uma estrutura aleatória para uma estrutura alinhada com o campo aplicado. Tal processo se dá porque, à medida que o campo magnético é aplicado, os domínios que estão orientados em direções favoráveis (ou seja, praticamente alinhados com o campo externo) crescem à custa daqueles que estão orientados de maneira desfavorável.

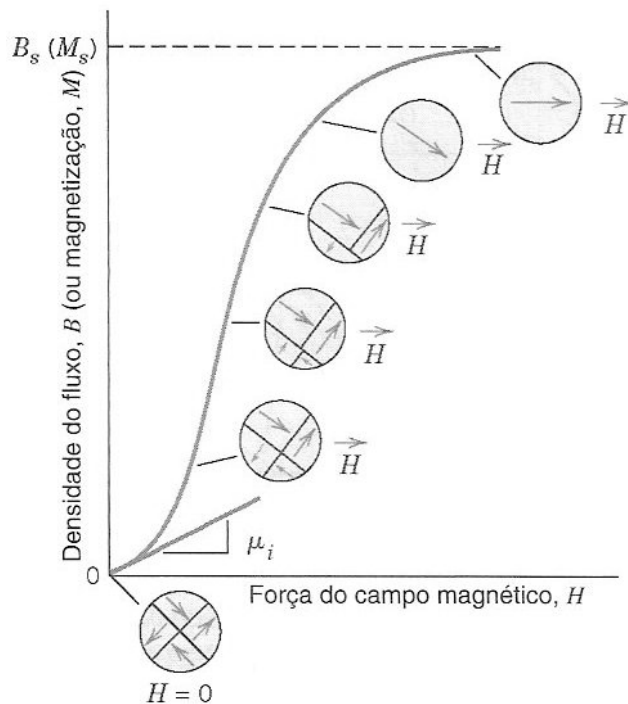


figura 2.5 – Domínios em vários estágios de magnetização [22]

2.4.1 Anisotropia magnetocristalina

A presença de um comportamento diferente das curvas de magnetização do material ferromagnético conforme a direção do campo magnético externo é conhecido como anisotropia magnetocristalina [7]. Dependendo da direção em que o campo magnético é aplicado, o material atinge a saturação de maneiras diferentes. Em um dado material a intensidade do campo magnético externo aplicado para que a saturação seja alcançada possui diferentes intensidades conforme a direção aplicada.

A direção em que a intensidade do campo magnético necessário para atingir a saturação magnética for mínima, será denominada como uma direção de fácil magnetização, também conhecida como direção espontânea. No caso do ferro, uma estrutura cúbica, existe três possíveis direções de fácil magnetização da família $\langle 100 \rangle$. Na figura 2.6, retirada de [7], é necessário um campo magnético de maior intensidade para magnetizar o monocristal de ferro nas direções cristalinas $\langle 110 \rangle$ e $\langle 111 \rangle$ do que na $\langle 100 \rangle$.

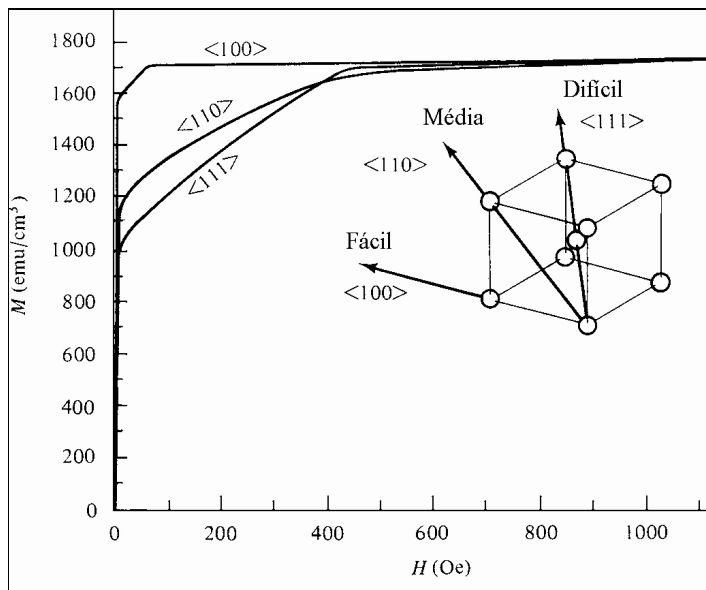


figura 2.6 – Efeito da direção cristalina na magnetização. Adaptado de [7].

2.4.2 Dissipação de energia

Durante o processo de magnetização e desmagnetização ocorre dissipação de energia em forma de calor, principalmente devido ao fenômeno da histerese e também pelas correntes elétricas de Foucault geradas no interior do material devido à movimentação de paredes de domínios, que produziram uma variação local de indução.

A histerese é devida à reação do material ao campo externo ser diferente se a intensidade deste campo for atingida a partir de campos crescentes ou decrescentes. Segundo a lei de Faraday, uma variação do fluxo magnético produzirá uma diferença de potencial elétrico, que provocará a circulação de uma corrente elétrica. Neste caso é conhecida como corrente elétrica parasita.

Na figura 2.7, a energia é acumulada durante o processo de magnetização do material, até atingir a indução máxima à medida que a intensidade do campo magnético cresce, e é calculada pela área $B * H$, representada pela região em cinza claro [7,24].

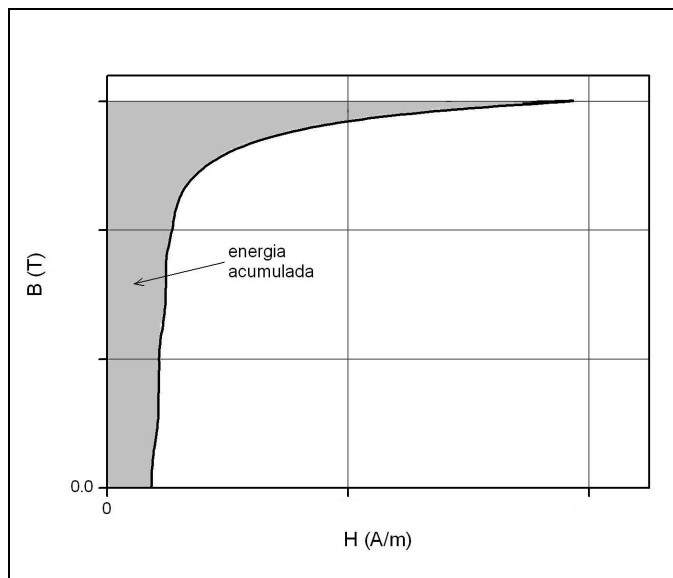


figura 2.7 – Energia acumulada no processo de magnetização [24]

Uma vez atingida a indução máxima aplicando um campo magnético máximo, à medida que se reduz a intensidade do campo magnético, a indução também irá reduzir, mas não seguirá o mesmo caminho de subida. Calculando a área neste trecho descendente, tem-se a energia devolvida. A diferença entre os valores de energia resultará na energia dissipada pelo material na forma de calor, vide figura 2.8. Quanto maior for o valor desta energia dissipada, o material será energeticamente pior, observando as mesmas condições de ensaio.

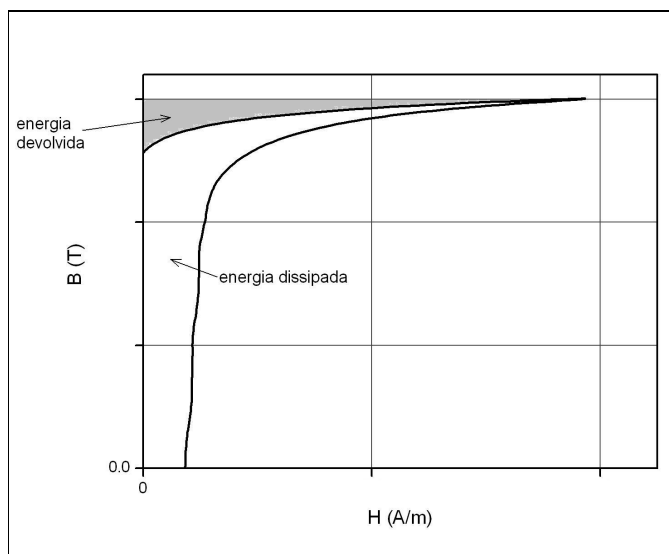


figura 2.8 – Energia dissipada e devolvida [24]

2.5 CURVA DE HISTERESE

A partir da saturação, ponto S na curva da figura 2.9, à medida que o campo H é reduzido pela reversão da direção do campo, a curva não retorna seguindo seu trajeto original. Produz-se um efeito de histerese, onde o campo B se defasa em relação ao campo H que é aplicado, ou diminui a uma taxa mais baixa. No ponto onde o campo H é zero (ponto R sobre a curva), existe um campo B residual que é chamado de remanência, ou densidade do fluxo remanescente ou residual, B_r , o material permanece magnetizado na ausência de um campo H externo [21,22].

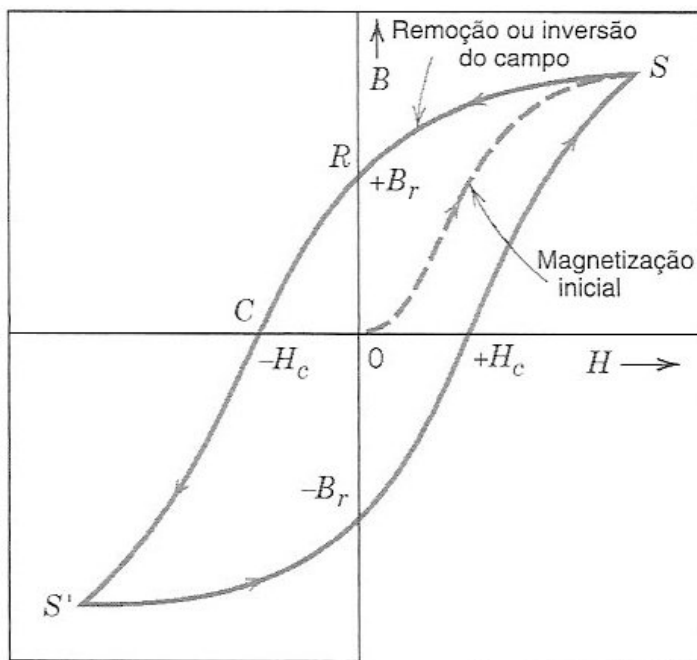


figura 2.9 – Curva de Histerese [22]

O comportamento de histerese e a magnetização permanente podem ser explicados através dos movimentos das paredes dos domínios. Com a reversão da direção do campo de saturação, o processo segundo o qual a estrutura do domínio se altera é invertida. Primeiramente, existe uma rotação do único domínio com o campo invertido. Em seguida, domínios que possuem momentos magnéticos alinhados com o novo campo se formam e crescem à custa dos domínios originais (da mesma forma que a magnetização inicial).

Crítico para esta explicação é a resistência ao movimento de paredes de domínio que ocorre em resposta ao aumento do campo magnético na direção oposta; isso é responsável pela defasagem de B em relação a H , ou a histerese. Quando o campo aplicado atinge zero, existe ainda uma fração volumétrica líquida de domínios que está orientada na direção original, o que explica a existência da remanência B_r . Para reduzir o campo B no interior da amostra até zero (ponto C na figura 2.9), um campo H de magnitude $-H_c$ deve ser aplicado na direção oposta à do campo original; H_c é chamado de coercividade, ou algumas vezes de força coerciva. Com a continuação do campo aplicado nessa direção inversa, como está indicado na figura 2.9, a saturação é finalmente atingida no sentido oposto, correspondendo ao ponto S' . Uma segunda inversão do campo até o ponto da saturação inicial (ponto S) completa o ciclo simétrico da histerese e também produz tanto uma remanência negativa ($-B_r$) como uma coercividade positiva ($+H_c$). A curva de histerese é muito importante no que se diz respeito a seleção de materiais magnéticos e também para efeito em uma classificação que se faz destes materiais. Existem materiais magneticamente moles e materiais magneticamente duros (ver figura 2.10).

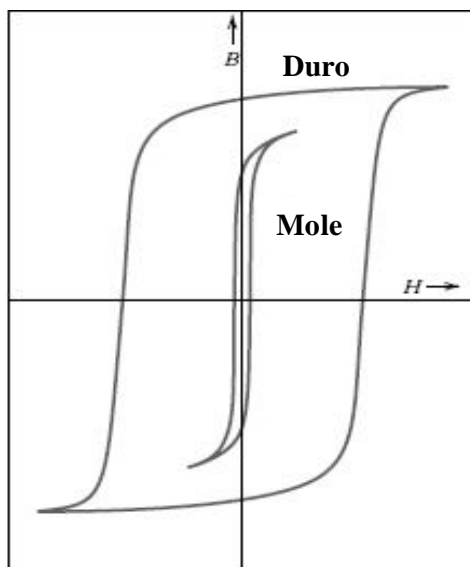


figura 2.10 – Comparação de um material magneticamente duro com um material magneticamente mole [22]

Os materiais magneticamente moles são materiais que possuem curva de histerese “fina”(figura 2.10), e precisam de baixos valores de H para serem totalmente magnetizados. Exemplos desses materiais são: ferro, ligas de ferro/silício, esses materiais possuem baixa perda de energia e são utilizados como núcleos de transformadores. Por outro lado, os materiais magneticamente duros são difíceis de magnetizar e desmagnetizar. Eles possuem curvas de histerese “grossas” (figura 2.10) e sua principal função é reter a magnetização quando o campo externo for removido, os ímãs permanentes possuem curvas de histerese “grossa” e são exemplos desta classe de materiais.

2.6 DIAGRAMAS DE FASES FERRO-CARBONO

O aço possui diversas fases que ocorrem por intermédio de diferentes temperaturas e concentrações de carbono. Para entendermos e estudarmos as microestruturas dos aços faz-se necessário o conhecimento prévio do diagrama de fases Ferro-Cementita, que retrata as principais fases dos aços e suas transformações. Contudo, é importante lembrar, em primeiro lugar, que a combinação do carbono e ferro, em equilíbrio termodinâmico, dará origem a diferentes fases para as diversas temperaturas avaliadas. O diagrama mais simples é o diagrama de equilíbrio Fe-C(grafita), neste diagrama as reações acontecem bem lentamente de maneira a atingir o equilíbrio termodinâmico, o que na escala industrial não acontece. Na produção industrial do aço, a solidificação e o resfriamento são muito rápidos para que o equilíbrio termodinâmico seja atingido. Com isso, ocorre a formação de uma fase metaestável, a cementita (carboneto de ferro – Fe_3C), no lugar da grafita.

Ainda que esta fase seja termodinamicamente metaestável, em termos de aplicações práticas ela é considerada estável, pois, na temperatura ambiente, o coeficiente de difusão do carbono no ferro é muito pequeno ($D=2,9 \times 10^{-19} \text{ cm}^2/\text{s}$), e a transformação de cementita em grafita é praticamente nula [28]. O diagrama de fase, que não é de equilíbrio, entre o ferro e a cementita é apresentado na figura 2.11.

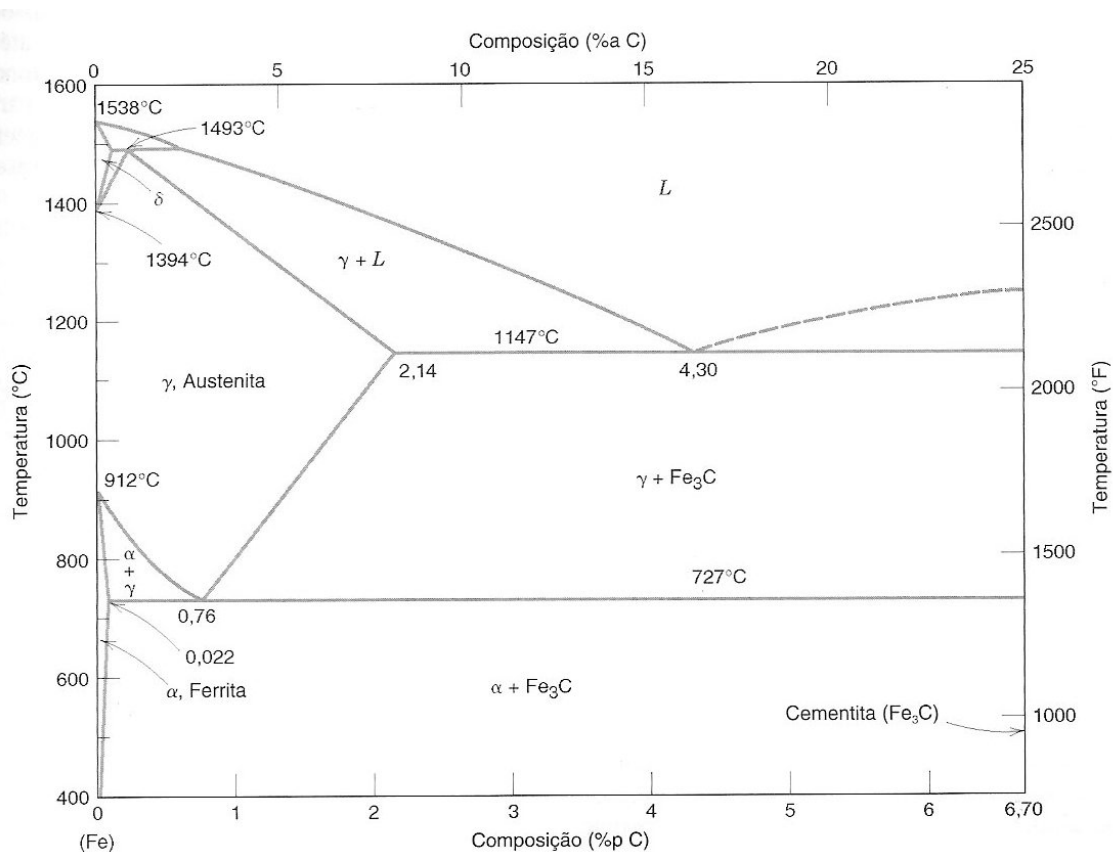


figura 2.11 – Diagrama de fases – Ferro-Cementita [28]

As fases que aparecem no diagrama da figura 2.11 são descritas a seguir [28]:

Ferrita (α): solução sólida de carbono em ferro CCC, existente até a temperatura de 912°C. Nesta faixa de temperatura, a solubilidade do carbono no ferro é muito pequena, chegando ao máximo de 0,020% a 727°C.

Austenita (γ): solução sólida de carbono em ferro CFC, existindo entre as temperaturas de 727 e 1495°C, e com solubilidade máxima de carbono no ferro de 2.11% a 1148°C.

Ferrita (δ): para pequenos teores de carbono, acima de 1394°C, o ferro muda novamente para cúbico de corpo centrado, dando origem a ferrita δ que é uma solução sólida de carbono em ferro CCC, sendo estável até 1538°C, quando o ferro muda para o estado líquido. Tendo o ferro uma estrutura CCC, a solubilidade do carbono é baixa, atingindo um máximo de 0.09% C a 1495°C.

Cementita (Fe_3C): é um carboneto de ferro com estrutura ortorrômbica e de elevada dureza. A cementita dá origem a um eutetóide de extrema importância no estudo dos aços, a perlita.

2.7 MICROESTRUTURAS DOS AÇOS

Após visto o digrama de fases Ferro-Cementita e seus principais pontos, será analisado agora de uma maneira mais detalhada as fases resultantes da decomposição da Austenita. Um aço resfriado muito lentamente a partir do campo austenítico apresentará, à temperatura ambiente, uma ou mais das fases: ferrita, perlita e cementita, dependendo do seu teor de carbono. Entretanto, se o resfriamento do aço a partir da região austenítica for muito rápido (por exemplo, resfriando-se diretamente em água ou em óleo), surgirão outros constituintes metaestáveis, como a bainita e a martensita, que não são previstos no diagrama de fases ferro-cementita para se acompanhar a formação desses constituintes, utilizam-se curvas TTT (temperatura, tempo e transformação). [28] A transformação da austenita em outro constituinte pode ocorrer por difusão, cisalhamento ou uma mistura dos dois mecanismos conforme pode ser observado na figura 2.12.

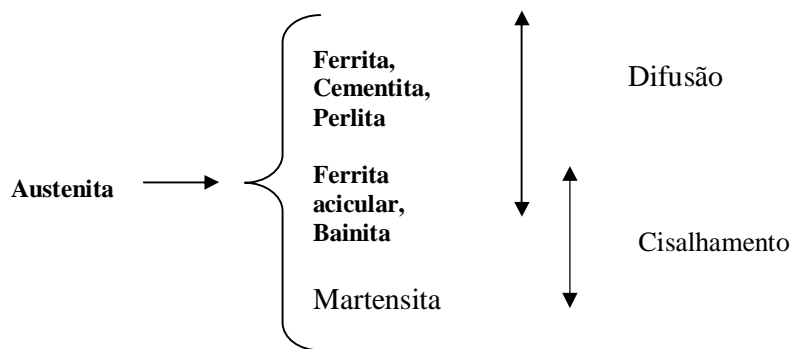


figura 2.12 – Mecanismos operantes na decomposição da austenita [28]

2.7.1 Transformação Austenita – Ferrita

Sob condições de equilíbrio, a ferrita pró-eutetóide (ferrita que se forma antes do ponto eutetóide) formará em ligas de ferro-carbono contendo até 0,77% C (Na prática 0.8%

C). A reação ocorre a 912°C no ferro puro, mas ocorre entre 912°C a 727°C nas ligas de ferro-carbono. Entretanto, pelo resfriamento a partir da região austenítica à temperatura abaixo da temperatura eutetóide, a ferrita pode ser formada abaixo de temperaturas tão baixas quanto 600°C [28,29].

2.7.2 Transformação Austenita – Cementita

A cementita é o carboneto de ferro (Fe_3C) contendo 6,67% de carbono, muito dura, quebradiça, é responsável pela elevada dureza e resistência dos aços de alto carbono, assim como pela sua menor ductilidade, ou seja, é muito frágil. Possui estrutura cristalina ortorrômbica [28,30].

2.7.3 Formação da Perlita

A perlita tem a característica microestrutural que assume ser uma mistura lamelar de ferro e carboneto de ferro. A perlita é um constituinte comum de uma larga variedade de aços, onde ela fornece uma contribuição substancial para a resistência, portanto não é surpresa que esta fase tenha recebido intenso estudo. As estruturas eutetóides lamelares deste tipo são generalizadas na metalurgia, e frequentemente a perlita é utilizada como um termo genérico para descrevê-las [28,29].

2.8 CURVAS DE TRANSFORMAÇÃO-TEMPO-TEMPERATURA (TTT)

Existem algumas fases que não podem ser estudadas no diagrama de fases Ferro-Cementita, pois tal diagrama é construído mediante a velocidades de resfriamento muito pequenas, quase no equilíbrio termodinâmico. Portanto, faz-se necessário o conhecimento de outro diagrama que mostre tais fases, chamado de diagramas de Transformação-Tempo-Temperatura.

Em um diagrama TTT de um aço eutetóide (figura 2.13), observam-se constituintes não previstos pelo diagrama de fases Ferro-Cementita, que são a bainita e a martensita.

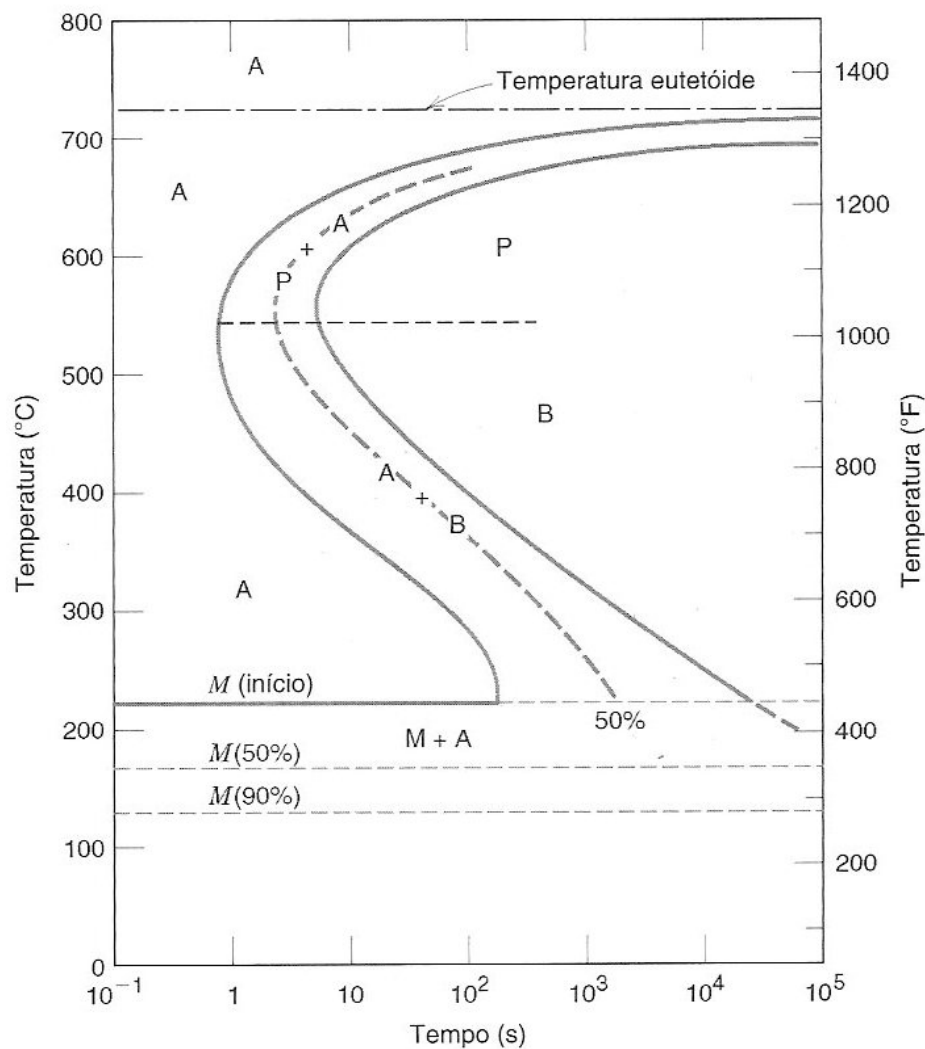


figura 2.13 – Diagrama TTT para uma liga ferro-carbono com composição eutetóide: A, austenita; B, bainita; M, martensita; P, perlita. [22]

2.8.1 Formação da Martensita

Em temperaturas mais baixas, na faixa aproximada de 200°C a 100°C, ocorre uma nova transformação, a qual independe do tempo, como as linhas M_i e M_f indicam na figura 2.13. Surge mais um novo constituinte denominado “martensita”. A martensita é uma fase metaestável que aparece com o resfriamento brusco da austenita (por exemplo, resfriando a amostra austenitizada em água). Assim, a transformação ocorre por cisalhamento da estrutura, sem difusão. O nome “transformação martensítica” é aplicado às reações no estado sólido que

ocorrem por cisalhamento sem mudança na composição química (difusão) e aparecem em vários sistemas, sendo o mais conhecido o ferro-carbono. Esse constituinte apresenta-se na forma de agulhas, com coloração clara. Sua dureza é muito elevada, cerca de 65 a 67 RC. Uma das teorias para explicar esta dureza elevada está ligada com a velocidade de resfriamento [28,30].

Outro ponto muito interessante que deve ser abordado é como a quantidade de carbono influencia na martensita. Com o aumento do teor de carbono do aço, diminuem as temperaturas de início (Mi) e fim (Mf) de formação da martensita [28,29]. Isso pode ser visto na figura 2.14.

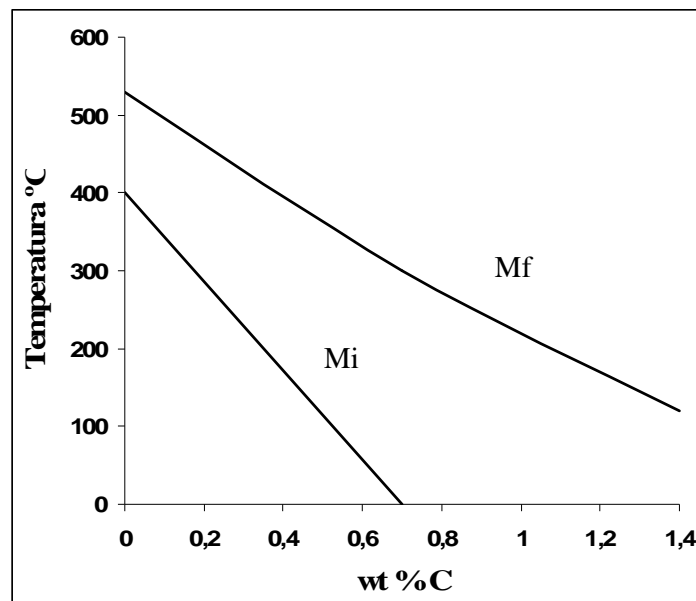


figura 2.14 – Efeito do teor de carbono na transformação da austenita em martensita. [29]

Deste modo, um aço com 0,8% de C resfriado bruscamente até a temperatura ambiente apresentará, aproximadamente, 80% de martensita e 20% de austenita não transformada, denominada austenita retida. Em aços ligados, o volume de austenita pode ser mais alto à temperatura ambiente. Para que essa austenita transforme-se em martensita, é necessário abaixar a temperatura da amostra, muitas vezes para temperaturas abaixo de 0°C. Gás carbônico sólido (-75°C) ou nitrogênio líquido (-196°C) são frequentemente empregados

nestes tratamentos, denominados tratamentos sub-zeros [28,29].

2.9 TRATAMENTOS TÉRMICOS

As ligas ferro-carbono, antes de serem utilizadas na forma de peças, são, na maioria dos casos, principalmente quando aplicadas em construção mecânica, submetidas a tratamentos térmicos ou a tratamentos termoquímicos. No primeiro caso, e mais importante para este trabalho, visa-se modificar as propriedades das ligas, sobretudo as mecânicas, ou aliviar as tensões e restabelecer a estrutura cristalina normal, ou ainda alcançar microestruturas objetivadas [28,29,42].

2.9.1 Reozimento

Seus objetivos são remover tensões devidas a tratamentos mecânicos, diminuir a dureza, aumentar a ductilidade, regularizar a textura grosseira de fusão, eliminar, finalmente, o efeito de quaisquer tratamentos térmicos ou mecânicos a que o aço tenha sido submetido anteriormente. A estrutura resultante do reozimento é a normal, ou seja, ferrita mais perlita, se o aço for hipoeutetóide, perlita mais cementita, se o aço for hipereutetóide e somente perlita, se for eutetóide [28,30,42].

2.9.2 Normalização

Os objetivos da normalização são idênticos aos do reozimento, com a diferença de que se procura obter uma granulação mais fina (menos grosseira) e, portanto, propriedades mecânicas mais apuradas. As condições de aquecimento do material são idênticas às que ocorrem no reozimento, entretanto o resfriamento é mais rápido ao ar [28,30,42].

A estrutura obtida na normalização é a mesma da obtida no reozimento, porém mais uniforme e fina. A normalização é ainda utilizada como tratamento preliminar à têmpera e revenido, justamente porque, sendo a estrutura normalizada mais homogênea que a de um aço laminado, por exemplo, reduz-se a tendência ao empenamento e facilita-se a solução de

carbonetos e elementos de liga, principalmente quando um aço é ligado.

2.9.3 Têmpera e revenido

O objetivo fundamental da têmpera das ligas ferro-carbono é obter uma estrutura martensítica, o que exige resfriamento rápido, de modo a evitar-se a transformação da austenita em seus produtos normais (perlita + ferrita ou cementita). De um modo geral, na têmpera, aquece-se o aço acima de sua zona crítica, durante o tempo necessário, em função da seção das peças, seguindo de resfriamento rápido em um meio como o óleo, água, salmoura ou mesmo ar [28,30,42].

O estado de altas tensões, a distorção do reticulado e a dureza extremamente elevada da martensita constituem inconvenientes que devem ser contornados e corrigidos. Para isso, submete-se o aço temperado à operação de revenido.

O revenido visa, portanto, corrigir os excessos de têmpera ou, em particular, aliviar, senão eliminar totalmente, as tensões e corrigir a excessiva dureza e conseqüente fragilidade do material, melhorando com isso, sua ductilidade e resistência ao choque.

A operação de revenido é realizada no aço temperado, imediatamente após a têmpera, a temperaturas abaixo da zona crítica. A temperatura será escolhida de acordo com os resultados finais desejados: aliviar apenas as tensões ou eliminá-las completamente e produzir redução de certo modo considerável da dureza [28,29].

2.10 TÊMPERA SUPERFICIAL

Essa operação tem por objetivo produzir um endurecimento superficial, pela obtenção de martensita apenas nas camadas externas do aço. É aplicada em peças que, pela sua forma e dimensões, são impossíveis de temperar inteiramente, ou quando se deseja alta dureza e alta resistência ao desgaste superficial, aliadas a boa ductilidade e tenacidade no núcleo das peças. É um tratamento rápido que, além disso, não exige fornos de aquecimento, a têmpera

superficial compreende dois processos: têmpera por chama e têmpera por indução [28,30].

2.10.1 Têmpera por indução

A idéia fundamental é submeter a peça a um rápido aquecimento de fora para dentro e, logo depois, à ação do meio de têmpera (ar, água, óleo ou outros). Com os parâmetros devidamente controlados, apenas a superfície é endurecida pela têmpera porque o interior não atinge temperatura suficiente.

O calor é gerado na própria peça por indução eletromagnética, utilizando-se, para isso, bobinas de indução através das quais flui uma corrente elétrica. Por meio desta técnica pode-se controlar a profundidade de aquecimento, e possuem aplicações em peças de formatos variados. A figura 2.15 exibe um esquema simplificado da têmpera por indução [28,30].

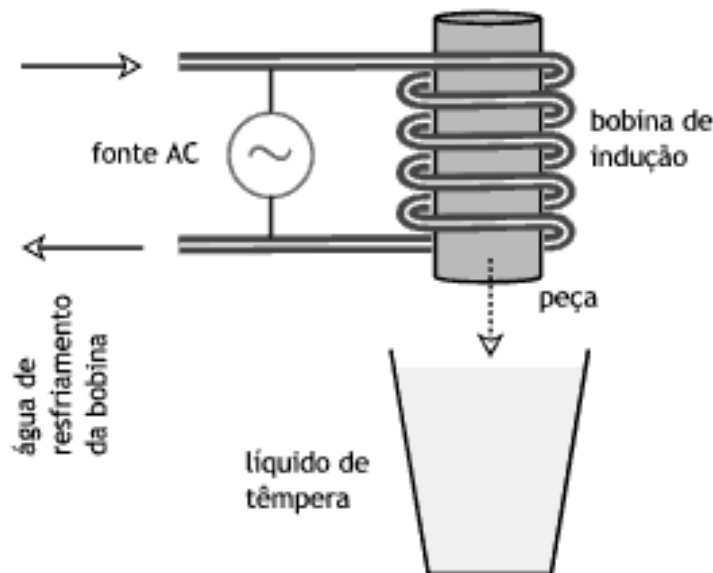


figura 2.15 – Têmpera por indução

O aquecimento é dado por uma bobina de indução à qual se aplica, por um certo tempo, uma corrente alternada cuja frequência pode ser de alguns quilohertz a poucos megahertz, dependendo das dimensões da peça e da profundidade desejada de têmpera. Em geral, a bobina tem algum meio de refrigeração para prevenir o próprio aquecimento, como

tubo com água.

Logo após o ciclo de aquecimento, a peça é submetida ao meio de têmpera (não necessariamente por imersão. Pode ser jato de água ou outro arranjo). Com bobinas de formato adequado, a têmpera por indução permite uma precisa definição da área a endurecer, mas o custo do processo é normalmente elevado [28,30].

2.11 DUREZA

Dureza é uma propriedade mecânica relacionada à resistência que um material, quando pressionado por outro material ou por marcadores padronizados, apresenta ao risco ou à formação de uma marca pontual. No caso dos metais, dureza pode ser descrita como a medida da resistência à deformação plástica. No entanto, esta definição pode variar. Para os metalúrgicos, dureza é a resistência a indentação; para os engenheiros projetistas é uma medida de tensão de escoamento; para engenheiros de lubrificação, é a resistência ao desgaste e ao risco e, para engenheiros de usinagem, é a resistência ao corte [32].

A maior parte dos testes de dureza é baseada em alguma forma de indentação. Existem diversos tipos de teste para determinar a dureza, entre eles devem ser destacados os testes de indentação estática. Nestes testes, uma esfera, cone ou pirâmide de diamante, é forçado sobre o material que está sendo testado. A relação entre a força e a área ou profundidade da indentação apresenta a medida da dureza.

Existem dois métodos gerais para classificação dos tipos de testes de indentação disponíveis. A primeira é a obtenção da medida de dureza compelindo-se um indentador contra o material a ser analisado, com uma força especificada, e medir a profundidade de penetração ou a área deformada para determinar o valor da dureza. O ensaio Rockwell utiliza o método de profundidade de penetração, enquanto os testes Brinell, Vickers, Knoop e ultrassônicos empregam a medida do diâmetro/diagonais para determinar a dureza.

A segunda classificação do teste de indentação é governada pela carga aplicada no

indentador. Desta forma, os testes podem ser classificados como de macro dureza ou de micro dureza. Detalhamento sobre os diferentes ensaios pode ser encontrado na literatura [33].

2.11.1 Teste de Dureza Rockwell

O teste de dureza Rockwell consiste em indentar o material sob teste com um cone de diamante ou indentador de esfera de aço endurecido. O indentador é pressionado contra a superfície do corpo de prova com uma pré-carga F_0 . Quando o equilíbrio é atingido, um dispositivo indicativo que segue os movimentos do indentador e responde às variações da profundidade de penetração é ajustado para a posição zero. Ainda com a pré-carga aplicada, uma segunda carga é introduzida, aumentando a penetração. Atingido novamente o equilíbrio a carga é removida, mantendo-se a pré-carga. A remoção da carga provoca uma recuperação parcial, reduzindo a profundidade da penetração. O aumento permanente na profundidade da penetração resultante da aplicação e remoção da carga é usado para calcular o valor da dureza Rockwell [34].

2.12 MEDIDAS DE RUÍDO BARKHAUSEN

Uma medida de ruído Barkhausen é uma técnica magnética não-destrutiva que pode ser utilizada para caracterizar materiais ferromagnéticos. O sinal obtido é sensível não somente ao estado microestrutural do material como também ao estado de tensões internas do mesmo. Por causa de tal fato, esta técnica pode se tornar muito atraente na caracterização microestrutural dos materiais, visto que não é necessário destruir a peça para caracterizá-la basta fazer medições magnéticas e interpretar os resultados [34,36-38].

Quando um campo magnético é aplicado, as paredes de domínio se movem e uma reorganização desta microestrutura magnética ocorre por causa de considerações energéticas, lembrando que o material sempre tende a minimizar sua energia interna.

Este fenômeno requer que as paredes de domínio se movimentem, tal movimento se dá

por meio de saltos descontínuos na magnetização. A captação destes saltos repentinos por uma bobina na vizinhança da amostra resulta no sinal de ruído Barkhausen. Ou em outras palavras podemos dizer que o sinal de ruído Barkhausen é produzido pelo movimento irreversível das paredes de domínio em um ciclo de magnetização. As paredes de domínio são ancoradas temporariamente pelas não-homogeneidades da microestrutura e então liberadas com uma variação na magnetização. As mudanças discretas nos locais de magnetização que resultam deste fato, podem ser detectadas como pulsos de voltagem em uma bobina ou uma cabeça de leitura magnética.

Normalmente, o valor rms de um pacote de sinais é plotado como uma função do campo magnético aplicado (figura 2.16). Na maioria dos casos, este pacote possui uma forma de pico singular e pode ser caracterizado por diferentes parâmetros, tais como a amplitude de ruído Barkhausen (ARB) e o campo magnético correspondente (H_{pico}) a partir de todos os parâmetros que poderiam ser medidos para o sinal de ruído Barkhausen. Estes dois parâmetros são utilizados na maior parte dos trabalhos para avaliar a microestrutura dos materiais.

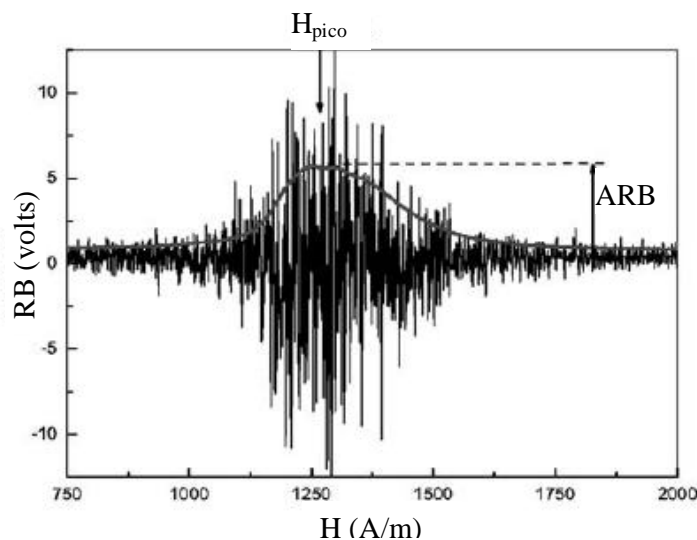


figura 2.16 – Sinal de ruído Barkhausen de um dado material [36]

Os saltos descontínuos das paredes ocorrem devido aos seus locais de ancoramento por diferentes obstáculos tais como, inclusões, precipitados, contornos de grãos, e sítios de discordâncias. O ARB diminui com um aumento do número destes locais de ancoramento. Um salto no H_{pico} em direção a valores mais altos de campo magnético também é observado quando a influência destes obstáculos sobre as paredes de domínio aumenta. Por causa disso a estrutura magnética está diretamente conectada com o estado da natureza metalúrgica, cada fase possui sua própria assinatura.

2.13 RELAÇÃO DA MICROESTRUTURA E O SINAL BARKHAUSEN

Pode-se perceber que a relação microestrutura – sinal de ruído Barkhausen é uma relação muito clara, pois o perfil do sinal muda muito nitidamente de uma microestrutura para outra. De acordo com vários trabalhos lidos pode-se observar que fatores como, fração volumétrica das fases, tamanho de grão, espessura das lamelas de perlita, dureza do material entre outros são fatores que influenciam no sinal para um dado material [37,38].

Para esclarecer a afirmação tomemos como exemplo a comparação realizada em um trabalho entre diferentes microestruturas para com seu sinal de ruído Barkhausen. As microestruturas analisadas são Martensita, Martensita revenida, Perlita fina e Perlita grossa.

A figura 2.17 mostra a relação microestrutura – sinal de ruído Barkhausen. A partir dela discutiremos a influência da microestrutura sobre o perfil de cada sinal. A amplitude máxima do sinal de ruído barkhausen (ARB) é uma função do tamanho do pulso das paredes de domínio, e o campo magnético correspondente (H_{pico}) representa o campo magnético resistente requerido para o movimento das paredes de domínio a partir dos locais de ancoramento.

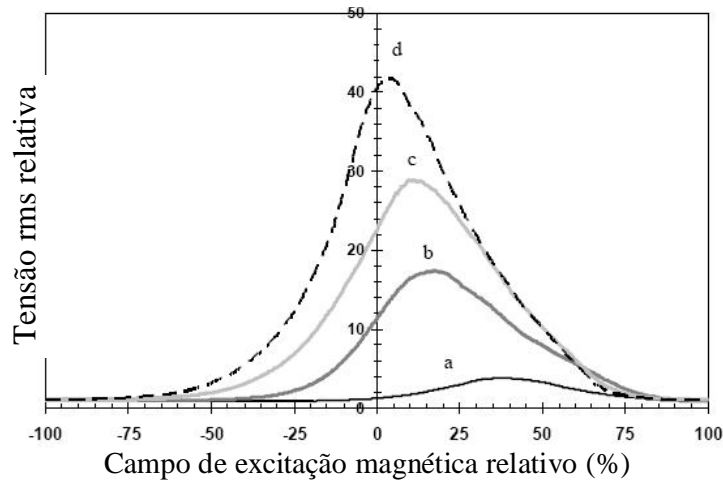


figura 2.17 – Tensão relativa (rms) x campo de excitação magnética relativo – (a) Martensita, (b) Martensita Revenida, (c) Perlita Fina e (d) Perlita Grossa. [37]

Pela figura 2.17 podemos observar que o pico de amplitude mais baixa ocorre para a martensita e assim vai aumentando até a perlita grossa. Ao passo que o campo magnético do pico vai aumentando da perlita grossa para martensita. O tamanho médio dos domínios é muito pequeno nas espécies resfriadas devido às pequenas agulhas de martensita. Além disso, o ancoramento das paredes de domínio devido à alta densidade de discordâncias nas ripas de martensita aumenta a resistência para o crescimento do domínio. A magnetização reversa requer um campo forte, os deslocamentos das paredes de domínio são curtos, e é difícil criar novas paredes. Consequentemente, o pico resultante do sinal de ruído Barkhausen é muito fraco e situa-se em um campo magnético mais elevado. Passando à martensita revenida, pode-se notar que as agulhas de martensita transformam em uma estrutura consistindo de partículas de cementita esferoidais em uma matriz ferrítica, e as tensões residuais são quase que completamente aliviadas. Em paralelo a mudança morfológica da microestrutura, a estrutura magnética torna-se mais grosseira, e o tamanho médio das paredes de domínio aumenta. Deste modo, a resistência à nucleação e ao movimento das paredes de domínio diminui, a amplitude do sinal aumenta consideravelmente, e o sinal de pico está situado em valores mais baixos de campos magnéticos requeridos (H_{pico}). As microestruturas consistindo de grãos ferríticos

vizinhos de colônias de perlita resultam em uma amplitude de sinal mais elevada. Os altos valores de amplitude (ARB) indicam que existe uma faixa mais larga de tamanhos de pulso nas amostras ferríticas/perlíticas do que naquelas amostras contendo martensita e martensita revenida. O tamanho máximo do pulso da parede de domínio para a ferrita é dependente do tamanho médio dos grãos ferríticos por causa da ação dos contornos de grão que atuam como lugares de ancoramento. A estrutura perlítica consiste de lamelas de ferrita e cementita que se formam ao longo de certas direções cristalográficas dentro do grão austenítico anterior. Sob o efeito de um campo magnético, a orientação preferencial entre as colônias lamelares poderá facilitar a passagem de uma parede de domínio através da interface da colônia, conduzindo a uma parede de domínio mais larga, isto significa caminho livre sob condições favoráveis. A amplitude de sinal de ruído Barkhausen (ARB) da perlita-ferrita grosseira é mais alta do que da perlita-ferrita fina, e existe uma considerável diferença nos perfis do sinal de Barkhausen entre elas. Tornando mais grosseira a perlita, resulta em um aumento adicional na amplitude de sinal (ARB), existe uma mudança significativa no tamanho do pulso. A resistência de excitação de campo requerida para mover as paredes de domínio a partir dos locais de ancoramento, isto é, interfaces entre regiões ferríticas e perlíticas, e aquelas entre camadas de ferrita e cementita, diminuem consideravelmente.

É interessante notar que este trabalho levou em consideração apenas um aço e sobre ele aplicou-se diferentes tratamentos térmicos, o que levou a diferentes microestruturas, porém com a mesma composição. Logo, não foi considerado na análise, o efeito da quantidade de carbono presente no aço, nem de elementos de liga. Foi considerado apenas o efeito de diferentes microestruturas sobre o sinal de ruído Barkhausen.

2.14 EFEITO DA QUANTIDADE DE CARBONO SOBRE O SINAL BARKHAUSEN

O efeito de diferentes composições sobre o sinal de Barkhausen pode ser observado em vários trabalhos, como é o caso das conclusões encontradas na referência [38], onde foram

analisados aços com diferentes composições (porcentagem de carbono na amostra) - (aço ABNT 1005, 1020, 1045 e 1070) e que receberam tratamentos térmicos semelhantes. Nos aços ABNT 1005 e 1020 com maior quantidade de ferrita, o deslocamento das paredes de domínio apresenta menos dificuldade porque neste caso, o material possui baixa densidade de locais de ancoramento, e conseqüentemente menos sinais de Barkhausen, as paredes de domínio se movimentam com facilidade e não tem que “pular” obstáculos, logo a amplitude do sinal de ruído Barkhausen é maior. Conforme a quantidade de carbono aumenta, também aumenta a quantidade de perlita no material, e, portanto a densidade de locais de ancoramento que impedem o movimento livre das paredes de domínio, até que a energia externa suficiente é provida para superar as barreiras de energia local criadas pelos locais de ancoramento. Isto é a razão para o qual nós observamos pulos largos de Barkhausen. Portanto, o sinal de Barkhausen aumenta para maiores quantidades de carbono (aço ABNT 1045). No aço ABNT 1070, alta quantidade de perlita existe, o qual aumenta a densidade de locais de ancoramento, mas também, a energia potencial dos locais de ancoramento. Esta energia potencial não pode ser facilmente superada. Deste modo, as paredes de domínio não se separam dos locais de ancoramento até que as duas superfícies da parede de domínio unem-se devido ao dobramento das paredes de domínio, neste caso existirá uma diminuição do sinal de Barkhausen.

Na avaliação das características dos aços utilizando técnicas de ruído Barkhausen, um trabalho importante foi realizado por Kleber et al. [35]. Este grupo realizou medições em aços de ferrita e martensita [34] contendo diferentes teores de carbono.

Durante o recozimento entre 750 e 860°C, o teor de carbono da martensita muda drasticamente enquanto que a ferrita é ligeiramente reduzida. Para simular as mudanças na composição martensita que pode ocorrer em diferentes temperaturas de recozimento, Kleber et al. estudaram aços B, C e D que foram totalmente austenitizados, respectivamente a 860, 850 e 800°C por 5 min e então resfriado na água.

Tabela 1- Composição dos aços % em peso.

Elemento	C	S	N	Mn	P	Si	Cu	Ni	Cr	Al	As
Aço A	0,071	0,005	0,007	0,437	0,012	0,009	0,006	0,006	0,014	0,058	0,001
Aço B	0,343	0,030	0,008	0,790	0,029	0,166	0,186	0,095	0,055	0,005	0,041
Aço C	0,476	0,003	0,004	0,654	0,012	0,020	0,022	0,024	0,221	0,007	0,002
Aço D	0,634	0,032	0,005	0,593	0,010	0,020	0,010	0,053	0,053	0,001	0,032

A amostra de ferrita foi obtida a partir de aço A, após um tratamento de recozimento a 700°C seguido por um rápido resfriamento em água. O teor de carbono na fase ferrita é, então, próximo ao limite máximo de solubilidade, ou seja, 0,02% em peso.

Resultados de ruído Barkhausen são plotados na figura 2.18 (a) e figura 2.18 (b) para amostras de ferrita e martensita.

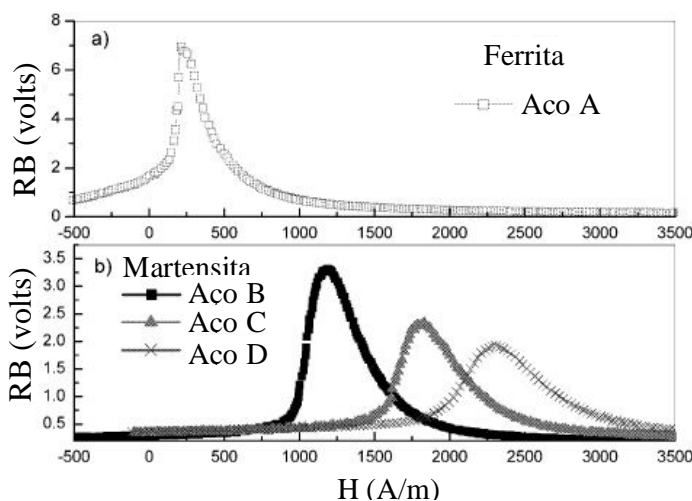


figura 2.18 – Resultado do ruído Barkhausen do (a) aço A e (b) aços B, C e D [34]

O sinal de ruído Barkhausen de aço de ferrita é bom, localizado em um campo magnético baixo (250 A/m) e mostra uma alta amplitude. No entanto, a assinatura Barkhausen da martensita é completamente diferente e depende claramente do teor de carbono. O aumento do teor de carbono na martensita resulta na redução do sinal e em um deslocamento do pico para um campo magnético mais elevado. O formato também é modificado desde o pico fica mais amplo.

A partir dessas medidas, tomam-se dois importantes parâmetros que são utilizadas atualmente, a amplitude máxima de ruído Barkhausen (ARB), e o campo magnético correspondente (H_{pico}). O primeiro está relacionado ao tamanho do salto das paredes durante a reorganização dos domínios, enquanto o segundo está mais diretamente ligado à força magnética necessária para mover as paredes.

Neste trabalho Kleber et al. [35] concluem que usando tratamentos térmicos em aços diferentes o sinal BN fica muito sensível à fração volumétrica de martensita e do teor de carbono.

Com as relações encontradas, concluiu-se que as medidas do sinal de ruído Barkhausen em aços podem levar à determinação de:

- Fração volumétrica de martensita (e ferrita) deduzida a partir da amplitude do pico de ferrite
- O teor de carbono do material deduzida a partir da amplitude do pico martensita
- O teor de carbono na martensita a partir da amplitude do pico martensita bem como a sua posição no campo.

Enfim, Kleber et al. [35] observam que estes resultados obtidos em aços ferrita-martensita tem que ser estendidos para os aços *Dual Phase* com uma menor fração volumétrica de martensita, a fim de demonstrar a viabilidade da utilização dessas técnicas de caracterização não destrutiva de aços industriais DP. Os resultados da figura 2.18 mostram que é possível obter informações interessantes quando os sinais da ferrita e da martensita são bem separados.

2.15 RUÍDO BARKHAUSEN PARA MEDIR A ESPESSURA DA CAMADA SUPERFÍCIAL DE AÇOS

Os tratamentos superficiais como a têmpera por indução, dão às peças industriais propriedades mecânicas e físicas diferentes para a superfície e o centro do material. A

sensibilidade da técnica Barkhausen à microestrutura dos aços oferece a possibilidade de distinguir separadamente os dois estados de superfície e de centro de uma peça tratada e, portanto de estimar a profundidade tratada. A têmpera superficial dá uma boa ilustração deste princípio (figura 2.19): sobre a base de peças cilíndricas em aço ferrita-perlita (sinal I), a têmpera maciça dá uma estrutura martensítica (sinal II). O sinal do aço temperado superficialmente por indução a 1mm (sinal III) apresenta contribuições dos dois estados, da superfície e do centro [3,39].

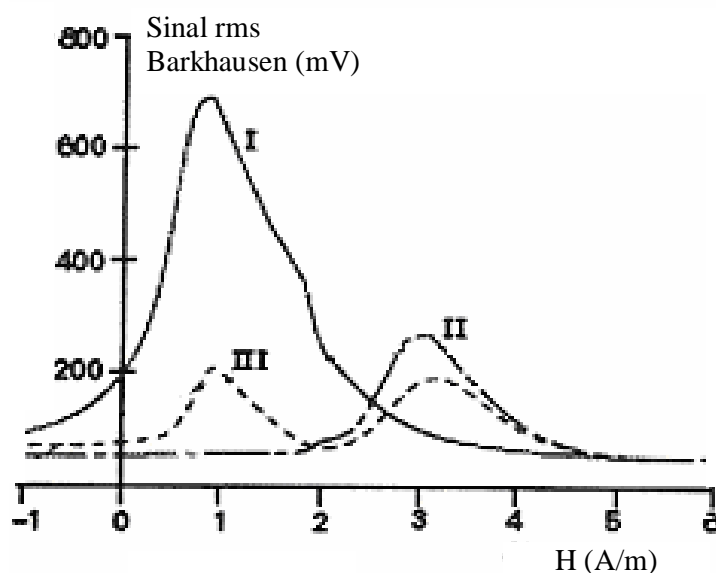


figura 2.19 – Sinal Barkhausen de peças cilíndricas em aço ferrita-perlita (I), martensítica (II) e temperado superficialmente (III) [39].

As posições de cada um dos picos correspondem aos sinais dos estados metalúrgicos maciços deste aço. Com o aumento da profundidade da tempera, o sinal de superfície aumenta, pois o volume da camada endurecida aumenta, e o sinal do centro diminui, pois seu volume diminui e ele é, também, atenuado pelas camadas da superfície. Com as condições experimentais bem adaptadas e uma escolha judiciosa do parâmetro medido, a espessura do tratamento pode ser quantificada com uma boa precisão [3,39,39].

O uso de ruído Barkhausen para medir a espessura de uma camada na superfície de um aço depende da possibilidade de observar sinais de ruído Barkhausen tanto da superfície como do núcleo do material. Medidas de ruído Barkhausen, em princípio, tem um alcance muito grande, para frequências entre 0,5 kHz e 10 MHz. Estes são os valores calculados a partir da equação clássica para a distância de penetração (skin depth):

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad (2)$$

onde f é a frequência, σ é a condutividade, e μ é a permeabilidade do material em questão. De fato, as grandezas nesta equação frequentemente são difíceis de determinar, especialmente num corpo de prova multifásico [7,40].

Portanto, são vários fatores que influenciam os sinais de Barkhausen, como por exemplo, diferentes tratamentos térmicos, diferentes quantidades de carbono e elementos de liga entre outros.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados os materiais e os métodos utilizados na confecção dos corpos de prova. Inicialmente alguns toróides foram fabricados para medidas da curva de histerese magnética e da susceptibilidade magnética. Descreve-se o traçador de curvas de histerese usado para este fim. Os ensaios não-destrutivos foram realizados através de medidas de ruído Barkhausen (RB). O sistema de medida de RB no Laboratório de Caracterização Magnética da UCS e as modificações são discutidas. Os perfis de dureza nos corpos de prova foram determinados pelo método tradicional (destrutivo).

3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

A confecção e o tratamento térmico das amostras foi realizada principalmente na empresa Susin Francescutti Ltda e com o apoio do Laboratório de mecânica da EEP SENAI Nilo Peçanha.

Foram confeccionados anéis, discos e eixos metálicos a partir de cilindros de aço ABNT 1045 e 1050 e virabrequins de aço ABNT 1548. O processamento inicial dos corpos de prova foi realizado na empresa Susin-Francescutti Ltda. Cilindros de aço foram aquecidos acima de 720°C por indução, com potências e durante tempos variáveis, e depois resfriados rapidamente em água, assim formando uma camada predominantemente martensítica na superfície. Em seguida, o material foi sujeito a um tratamento térmico de revenimento (190°C/1,5h) usualmente utilizado na Sufran nos virabrequins.

3.1.1 Confeção dos anéis (toróides)

Para ter uma idéia do comportamento magnético do material, foram fabricados inicialmente três toróides do aço ABNT 1548 cuja superfície havia sido endurecida. O toróide possui um fator desmagnetizante igual a zero e, portanto, é possível conhecer exatamente o campo magnético produzido no toróide. Além disso, a formação de um toróide pela remoção do material no centro de um disco, torna mais comparável a quantidade do material duro e a quantidade do material mole no corpo de prova. Anéis com dimensões de 54mm de diâmetro externo, 34mm de diâmetro interno e 10mm de espessura foram obtidos do corte de um virabrequim, retirado da linha de produção para análise. Foram cortados discos com a espessura aproximada de 10mm. Estas amostras foram retiradas mais especificamente do mancal local onde foi feito o tratamento térmico superficial. Posteriormente foi realizada uma furação no centro do disco e por fim a espessura foi ajustada em 10mm. A figura 3.1 mostra um toróide antes de enrolar o fio de cobre e outro já pronto com enrolamento primário e secundário.

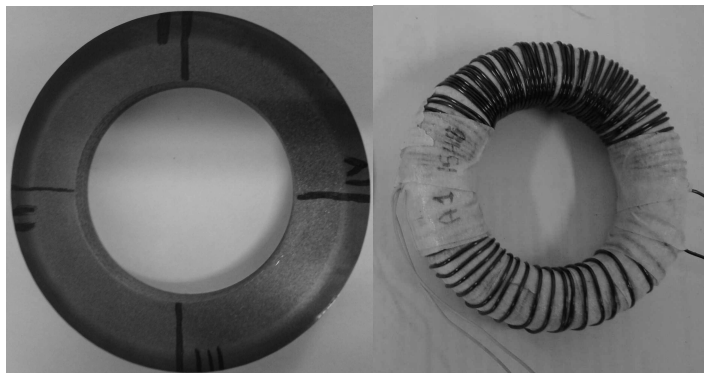


figura 3.1 – Toróides do aço ABNT 1548

Os resultados não foram os esperados, pois a camada endurecida não era uniforme como pode ser visto na figura 3.1. A parte mais escura do toróide sem o enrolamento representa a camada endurecida. Então foram fabricados mais três toróides, retirados de outro virabrequim, novamente foi verificado que a camada endurecida não era homogênea. Estes

toróides foram identificados como A1, A2, A3, A4, A5 e A6.

3.1.2 Confeção dos cilindros e discos na Sufram

Cilindros de aço ABNT 1045 e 1050 com dimensões de 54mm de diâmetro, e 500mm de comprimento, foram levados a um forno para realizar um tratamento de normalização para aliviar as tensões geradas durante a usinagem. Para o tratamento de normalização os cilindros foram aquecidos durante trinta minutos a uma temperatura de 860°C e depois tirado do forno e resfriado no ar. Dois cilindros de cada material foram preparados, um para corte em discos e o outro para as medidas magnéticas. Na etapa seguinte foi realizado o tratamento térmico superficial por indução, em princípio por tempos e temperaturas iguais, sendo que no mesmo cilindro foram realizadas quatro têmperas com profundidades de camada diferentes, com uma distância de aproximadamente 100mm uma da outra para não haver influência entre elas. Em seguida, quatro corpos de prova em formato de disco foram obtidos pela corte de um dos cilindros. Na tabela 2 estão listados os corpos de prova que foram fabricados.

Tabela 2 – Corpos de prova fabricados

Materiais	Comentários
Aço 1548	Foram fabricados seis discos, retirados de dois virabrequins, realizaram-se medidas de dureza e medidas magnéticas. Não apresentavam camadas uniformes.
Aço 1045-1	Foram fabricados dois cilindros, um foi cortado para a obter quatro discos, realizou-se medidas de dureza nos discos e medidas de ruído Barkhausen no cilindro. Não apresentavam camadas uniformes.
Aço 1050-1	Foram fabricados dois cilindros, um foi cortado para a obter quatro discos, realizou-se medidas de dureza nos discos e medidas de ruído Barkhausen no cilindro. Não apresentavam camadas uniformes.
Aço 1045-2	Foram fabricados dois cilindros, um foi cortado para a obter quatro discos, realizou-se medidas de dureza nos discos e medidas de ruído Barkhausen no cilindro. Apresentaram camadas uniformes e profundidades entre 3 e 5mm.
Aço 1050-2	Foram fabricados dois cilindros, um foi cortado para a obter quatro discos, realizou-se medidas de dureza nos discos e medidas de ruído Barkhausen no cilindro. Apresentaram camadas uniformes e profundidades entre 3 e 5mm.
Aço 1050-3	Foram fabricados dois cilindros, um foi cortado para a obter quatro discos, realizou-se medidas de dureza nos discos e medidas de ruído Barkhausen no cilindro. Não apresentaram camadas uniformes e profundidades entre 1 e 4mm.

3.2 MEDIDAS DE DUREZA

Os ensaios de dureza por micro indentação foram realizados como primeira avaliação das características mecânicas das superfícies. O ensaio de dureza por micro indentação foram realizado no grupo de usinagem (GUS) do Centro de Ciências Exatas e Tecnologias (CCET) da Universidade de Caxias do Sul (UCS). Amostras em forma de anel de aço ABNT 1548 e discos de aço ABNT 1045 e 1050 foram estudados para verificar a profundidade da têmpera superficial por indução. Para este fim, usou-se um microdurômetro Shimadzu, modelo HMV-2, com uma carga de 1 kg, de acordo com a norma ABNT NBR NM ISO 6507-1:2008. O perfil de dureza num corpo de prova típico é visto na figura 3.2. Foram realizados perfis transversais de dureza em cada amostra. A distância de 0,25 mm foi respeitada entre as indentações.

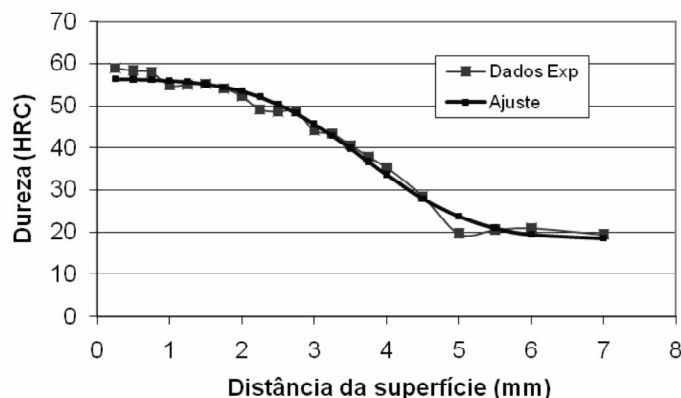


figura 3.2 – Perfil de dureza (HRC) em aço ABNT 1548, amostra 3-90.

Mostramos os pontos experimentais e um ajuste aos dados. O perfil experimental foi aproximado por uma curva teórica da seguinte forma

$$y = c1 \operatorname{erfc} \left\{ (t - \lambda1) / \lambda2 \right\} + c2 \quad (1)$$

para extrair parâmetros como a dureza e a distância onde o incremento superficial da dureza cai a metade ($\lambda1$). A função error complementar $\operatorname{erfc}(x)$ tem a sua definição usual. Na equação acima, t representa a distância radial abaixo da superfície e y representa a dureza

Rockwell HRC. A dureza da superfície é dada por $2c_1 + c_2$, enquanto c_2 representa a dureza do núcleo. λ_1 e λ_2 governam a largura da camada dura e a largura da transição. Para a curva teórica da figura 3.2, $\lambda_1 = 3,7$ mm e $\lambda_2 = 1,7$ mm. Para obter o ajuste da figura, valores de c_1 e c_2 foram escolhidos primeiro. Em seguida, λ_1 e λ_2 foram variados usando a rotina Excel Solver para obter os valores que melhor representam os pontos experimentais [17].

3.3 MEDIDAS COM TRAÇADOR DE CURVAS DE HISTERESE MAGNÉTICA

As medidas magnéticas foram integralmente conduzidas no Laboratório de Caracterização Magnética (LCM) da Universidade de Caxias do Sul (UCS).

O traçador de curvas de histerese (TCH), da Globalmag foi desenvolvido para realizar a caracterização de materiais ferromagnéticos de alta permeabilidade. Em uma única unidade estão integrados um gerador de corrente senoidal de até 3A de pico (13Vp máx), um integrador eletrônico e um sistema de aquisição de dados (10 bits). Com este instrumento é possível obter os seguintes dados:

- Curva de histerese magnética (para frequências de 0,05 Hz a 400 Hz H senoidal)
- Curva de permeabilidade AC (para frequências de 0,05 Hz a 400 Hz H senoidal)
- Valor das perdas magnéticas (pela área do ciclo de histerese)

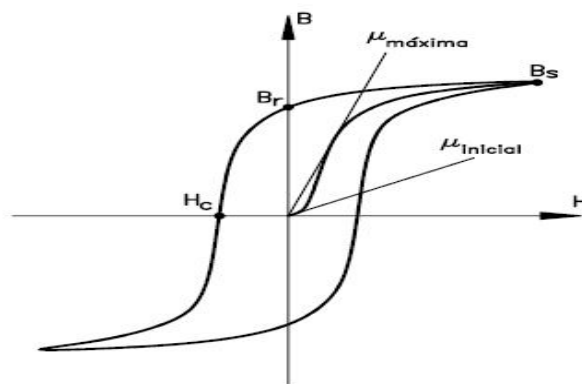


figura 3.3 – Curva de histerese idealizada obtida pelo TCH.

A figura 3.3 apresenta uma curva de histerese idealizada onde podem ser obtidos os

valores de campo coercivo H_c , indução remanente B_r , indução de saturação B_s , permeabilidade inicial e máxima.

3.3.1 Princípio de funcionamento do TCH

O TCH é constituído por um amplificador de corrente de até 3A capaz de magnetizar pequenas amostras mantendo o campo magnetizante senoidal. Um resistor "shunt" fornece uma tensão proporcional à corrente elétrica no enrolamento primário que permite estimar o campo H . Um circuito integrador processa o sinal do enrolamento secundário e permite gerar um sinal proporcional à indução magnética B . Estes sinais são digitalizados pelos conversores analógicos/digitais ADC1 e ADC2 e enviados ao computador por meio da saída RS232C / USB. A figura 3.4 apresenta o diagrama geral do TCH para o estudo de pequenas amostras.

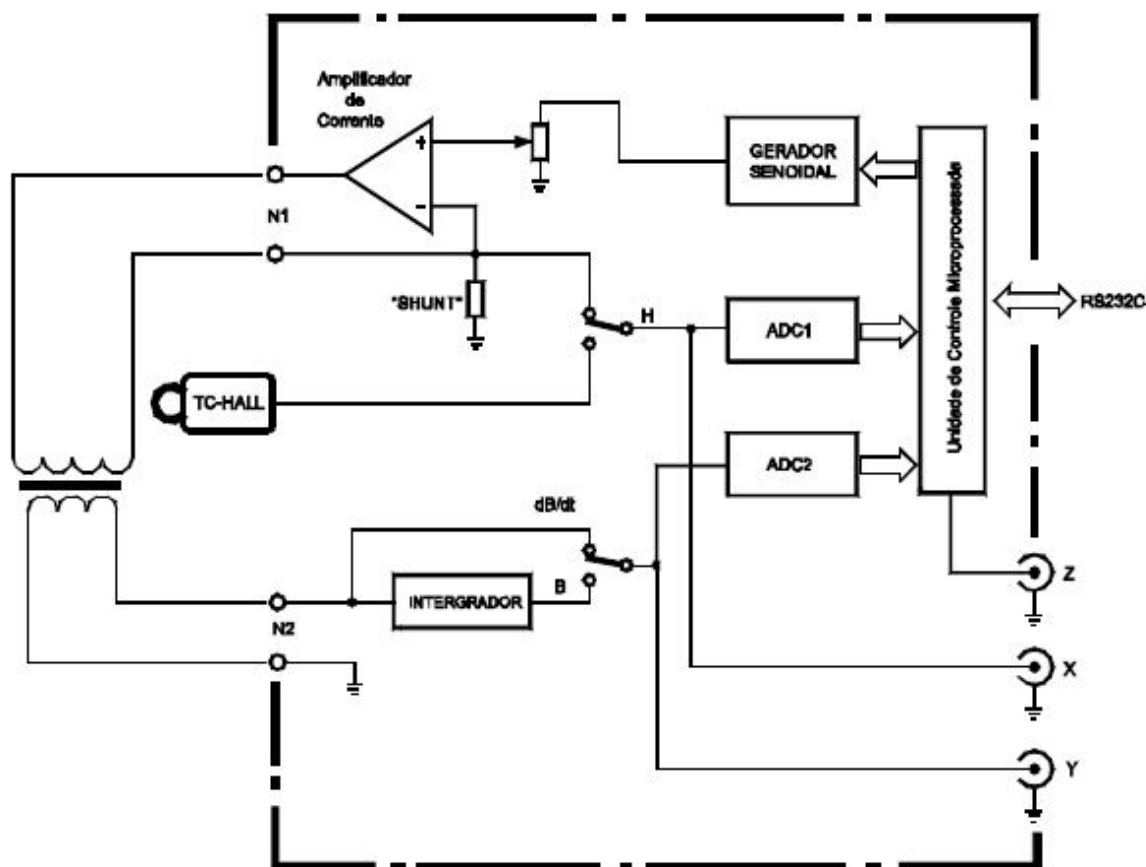


figura 3.4 – Diagrama geral do TCH para o ensaio de pequenas amostras.

3.3.2 Ensaio magnético

Para realizar um ensaio no TCH é necessário preparar dois enrolamentos: o primário e o secundário. O enrolamento primário irá produzir o campo magnetizante. A corrente do enrolamento primário pode ser produzida pelo próprio TCH e medido através de um resistor “shunt”. Uma fonte externa também pode ser empregada, e neste caso, o TCH irá medir a corrente por meio de um transdutor de corrente Hall.

Para circuitos magnéticos fechados e enrolamentos uniformemente distribuídos o valor do campo magnetizante é dado pela seguinte expressão:

$$H = N_1 I / L \quad (2)$$

Sendo:

H = campo magnético aplicado em A/m.

N_1 = número de espiras do primário.

I = corrente elétrica no primário em A.

L = comprimento do circuito magnético em m.

O enrolamento secundário produzirá um sinal proporcional à variação do fluxo magnético no tempo ($d\Phi/dt$). O circuito integrador produzirá, ao final de seu estágio, uma tensão proporcional à indução magnética B é capaz de processar o sinal proveniente do enrolamento secundário em duas possibilidades:

a) $d\Phi/dt$ = sinal proporcional a variação do fluxo magnético $N_2 \cdot d\Phi/dt$.

b) Φ = tensão proporcional ao do fluxo magnético .

A equação permite o cálculo do valor da indução magnética (B) a partir do sinal Φ .

$$B = \Phi \cdot RC / N_2 \cdot A \quad (3)$$

Sendo:

B = indução magnética em T.

Φ = tensão na saída do integrador em V.

RC = constante de tempo do circuito integrador em s (10^{-1} s, 10^{-2} s ou 10^{-3} s).

N_2 = número de espiras do secundário.

A = área da seção da amostra em m^2 .

3.3.3 Medidas magnéticas nos toróides

Após as medidas de dureza, a parte central de alguns discos foi removida resultando num corpo de prova com forma de toróide com diâmetro externo de 54 mm e interno de 34 mm. Um enrolamento primário ($N_1 = 100$ espiras de fio 24 AWG) e um enrolamento secundário ($N_2 = 200$ espiras de fio 38 AWG) foram enrolados no toróide para as medidas magnéticas. Curvas de histerese magnética foram obtidas para frequências de 0,05-60 Hz com um traçador de curvas de histerese (TCH) da Globalmag Ltda. Um exemplo dessas medidas é mostrado na figura abaixo.

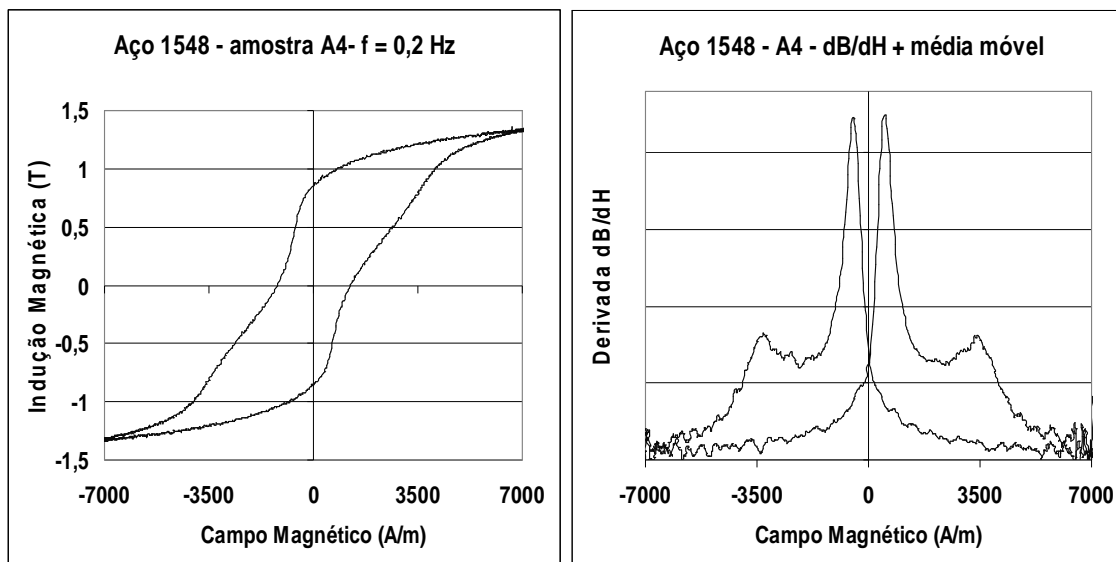


figura 3.5 – Curva de histerese $f = 0,2$ Hz (esquerda) e derivada da mesma curva (direita)

Para frequências abaixo de 1 Hz, é possível notar a presença de duas transições. A derivada da curva de histerese mostra isto claramente. O pico maior, localizado em torno de $H=800$ A/m, corresponde ao sinal proveniente do interior da peça, enquanto o pico menor, localizado em torno de $H=3500$ A/m, vem da camada dura na superfície. O estudo de toróides

permite controlar as proporções relativas dos materiais duro e mole no corpo de prova. Além disso, permite determinar com certa precisão o campo coercivo associado com cada contribuição, uma vez que os campos magnéticos aplicados ao corpo de prova estão bem definidos.

3.4 RUÍDO BARKHAUSEN

O ruído Barkhausen consiste em séries de pulsos de tensão que são detectados nas extremidades de uma bobina sensora enrolada em torno de uma amostra de material ferromagnético submetida a um campo magnético variável. Este ruído é induzido por flutuações irregulares no movimento de uma parede de domínio, ou seja, por variações abruptas e irreversíveis na magnetização do material, chamados de saltos Barkhausen, geradas principalmente pelo aprisionamento e, subsequente, desaprisionamento das paredes de domínios magnéticos durante seu movimento. Centros de aprisionamento de paredes de domínio estão associados à existência de desordem estrutural gerada por defeitos, presença de grãos em materiais policristalinos, discordâncias e deformações na rede, flutuações na composição, presença de inclusões, precipitados, impurezas ou tensões localizadas no material. Ou seja, o efeito Barkhausen parte da idéia de descrever o movimento de paredes de domínio como uma sequência randômica de saltos elementares das paredes de domínio entre posições metaestáveis, tentando, então, interpretar as propriedades do efeito em termos dos efeitos de correlação entre os saltos.

3.4.1 Medidas do ruído Barkhausen

Cada movimento abrupto de uma parede de Bloch induz uma variação de fluxo; uma bobina corretamente orientada é colocada na proximidade do material e permite transformar as variações de fluxo induzidas pela perturbação em pulsos de tensão.

Cada evento Barkhausen no material induz um pequeno pulso de tensão nas margens

da sonda e a soma de todos estes eventos é um ruído elétrico, cuja intensidade depende do campo aplicado. O máximo de atividade corresponde à parte mais inclinada do ciclo de histerese (vizinhança do campo coercivo H_c), quando a maior parte dos movimentos das paredes se produzem.

Segundo Nummila [15] devesse regular a força do campo magnético criado no objeto de medida pelo bobina de magnetização, de tal modo que a força máxima do campo magnético não excede a força coerciva da parte endurecida do objeto de medida, mas exceda a força coerciva da parte não endurecida do objeto de medida.

3.4.2 Sistema de medida

Uma aparelhagem de medida de ruído Barkhausen é composta três partes, a excitação magnética, a sonda Barkhausen (sensor) e o tratamento do sinal medido. O sistema usado para medir RB na Universidade de Caxias do Sul é mostrado no diagrama de blocos da figura 3.6.

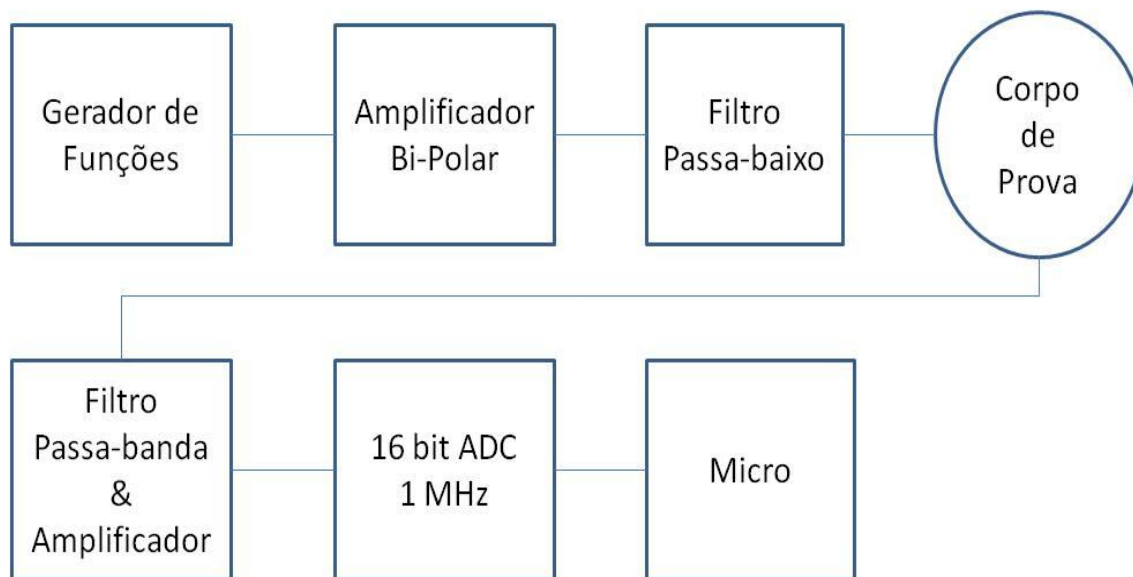


figura 3.6 - Diagrama de blocos do sistema para medir ruído de Barkhausen

A excitação magnética visa aplicar um campo magnético variável na peça para provocar o efeito Barkhausen, a excitação é assegurada por uma bobina primaria ou bobina excitação que é alimentada com uma corrente variável fornecida pelo amplificador bipolar

Kepeco (BOP 36-6M) que é controlada por um gerador de sinais (Stanford modelo DS345). Esta bobina primária nas amostras em forma de anéis é construída com 100 espiras de fio de cobre 24 AWG enrolada em torno do anel, nas outras amostras a bobina é construída com 120 espiras de fio de cobre 24 AWG enrolada em um yoke de ferrite em forma de “U”, onde suas pontas foram usinadas para poder dar o melhor contato com as amostras.

Cada movimento abrupto de uma parede de domínio induz uma variação de fluxo; que é captada pela sonda Barkhausen (sensor). Uma bobina colocada na proximidade do material permite transformar as variações de fluxo induzidas pela perturbação em pulsos de tensão. Esta bobina, que algumas vezes é chamada de bobina secundária ou bobina sensora, nas amostras em forma de anéis é construída com 200 espiras de fio de cobre 36 AWG enrolada em torno do anel e concentrada em um único ponto, nas outras amostras a bobina é construída com 200 espiras de fio de cobre 36 AWG enrolada em um ferrite em forma de “T”, onde uma de suas pontas foram usinadas para poder dar o melhor contato com as amostras.

Tratamento do sinal medido, no nível da sonda Barkhausen, o sinal medido é bastante fraco, inferior ao milivolt e cobre uma gama espectral bastante ampla, indo de 100 Hz a MHz. Ele é primeiramente filtrado e amplificado. Duas ações de filtragem são necessárias: um filtro passa-baixa para eliminar os parasitas de alta frequência e um filtro passa-alta para se liberar das variações lentas de fluxo magnético através da seção da bobina da sonda. Para realizar esta ação um filtro passa banda de 5-100KHz com amplificação foi utilizado. O sinal Barkhausen, ou seja, os pulsos de tensão já filtrados e amplificados são adquiridos por uma placa de aquisição de dados modelo Daqboard/3005 ligada a um computador. Através do programa DAQView os dados pode ser visualizado e salvo, para ser utilizado em outros programas de tratamento de dados como o Excel. Os dados são salvos como arquivos ASCII, bin, DIAden e Matlab.



figura 3.7 – Equipamento para medidas de ruído Barkhausen

3.4.3 Sensor

Ensaio magnético não-destrutivo deve ser realizado a partir da superfície da peça (ver figura 3.8), e portanto, um bom contato entre o sensor e a peça a ser medida é importante. Qualquer separação entre o sensor e o objeto a ser medido introduz um fator de desmagnetização no circuito secundário e reduz o fluxo acoplado ao sensor.

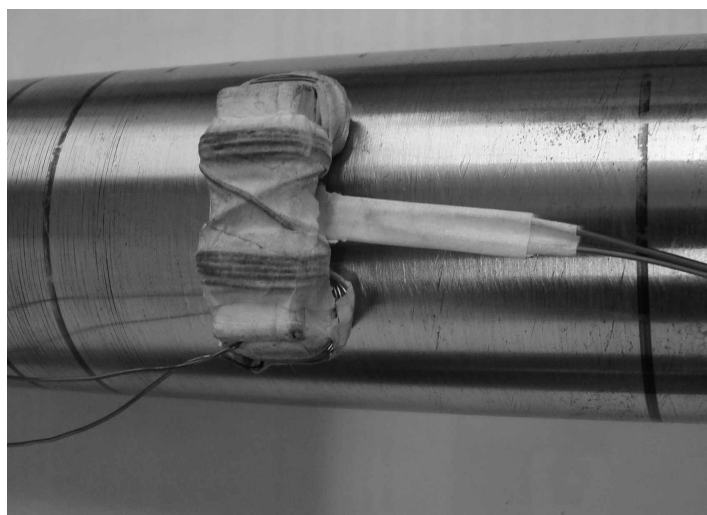


figura 3.8 – conjunto yoke/sensor na superfície do cilindro

O conjunto yoke/sensor é extremamente importantes na medição do sinal Barkhausen. Por isso, os mesmos foram cuidadosamente otimizados para poderem realizar a magnetização e a leitura do sinal. Primeiro foi introduzida uma curvatura nas pontas do yoke de ferrite em forma de “U” para que o yoke pudesse manter contato perfeito com o cilindro no sentido circunferencial (ver figura 3.9). Este mesma curvatura foi introduzida no ferrite do sensor para otimizar o sinal captado. Depois foi enrolado a bobina de excitação no yoke com 120 espiras de fio de cobre 24 AWG, e a bobina sensora na ferrite do sensor com 200 espiras de fio de cobre 36AWG.

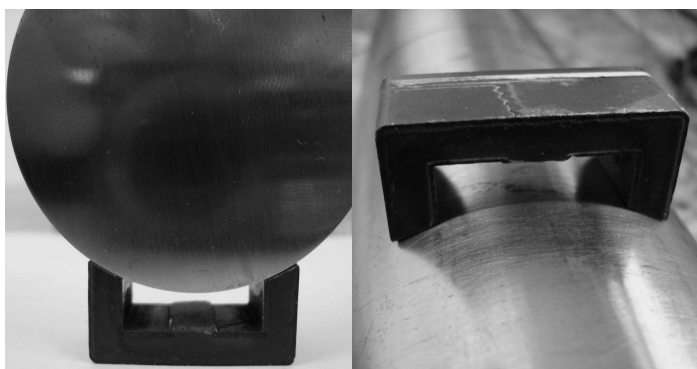


figura 3.9 – Curvatura nas pontas do yoke de ferrite

3.4.4 Filtro

O sinal de voltagem induzido no sensor de Barkhausen é constituído de diversas frequências. Como foi visto acima, as baixas frequências são especialmente importantes, pois trazem informações de níveis profundos da amostra, enquanto as altas representam melhor a superfície do corpo de prova. Na prática notou-se que o filtro com banda de 5 a 100KHz não apresentava bons resultados. Então foi desenvolvido um filtro passa baixa com frequência de corte de 20KHz (ver figura 3.10), eliminando assim todas as frequências superiores a 20KHz, o mesmo foi ligado na saída do filtro já existente e os resultados foram bastante animadores, pois se limitou a faixa de 5 a 20KHz com esta interação dos dois filtros.

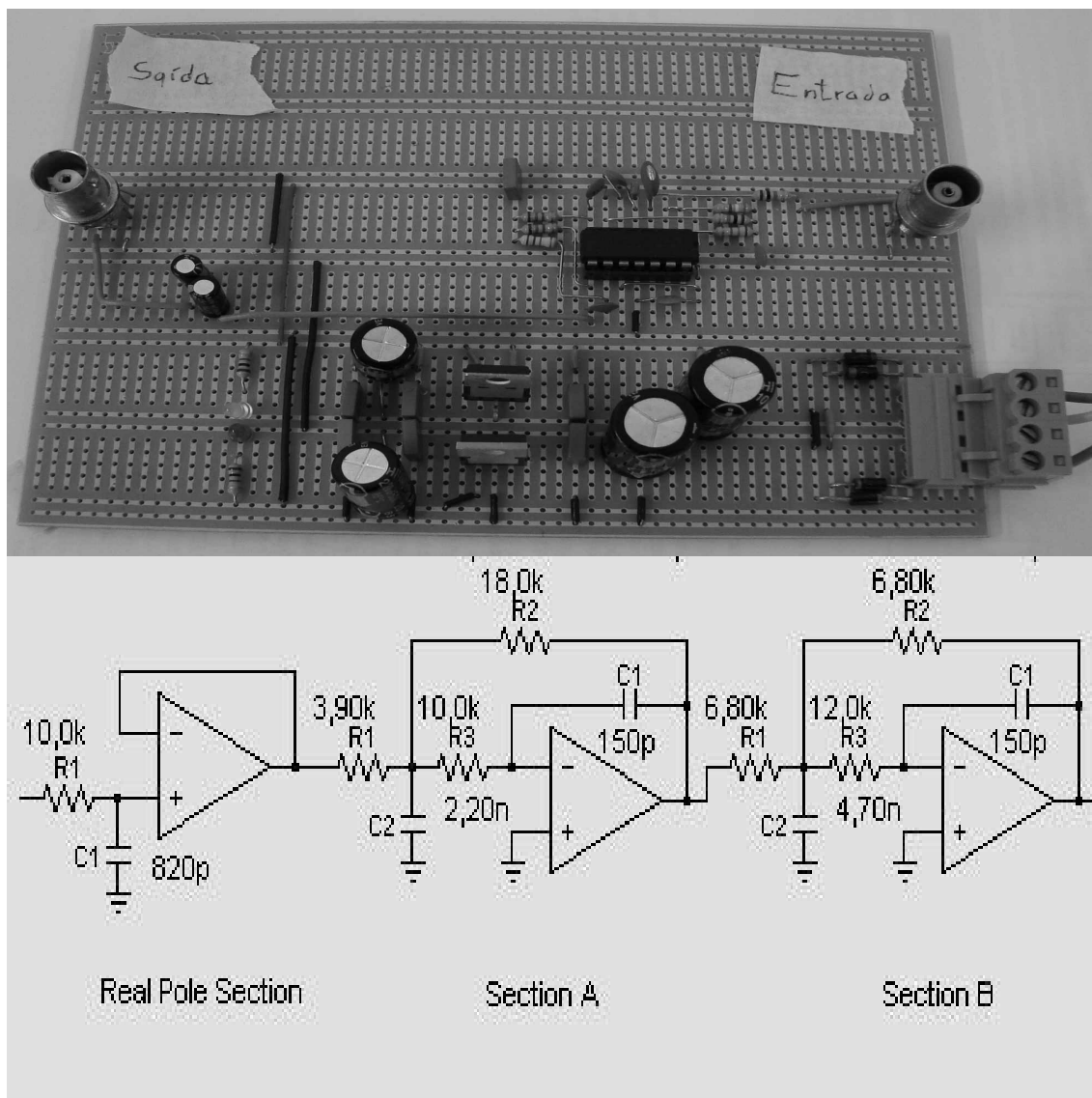


figura 3.10 - Filtro passa baixa

3.4.5 Cálculos

A placa de aquisição de dados capta os sinais do sensor e armazena tudo num microcomputador. Um dos formatos dos dados armazenados é o txt, que é utilizado no software Excel para o cálculo da voltagem rms do RB. Este cálculo é um processo trabalhoso e bastante manual porque os arquivos são grandes, 30000 pontos por leitura com uma taxa de aquisição de 250000 pontos por segundos, e tornam muitas vezes o cálculo quase impossível, obrigando a divisão dos dados em vários arquivos e dificultando muito na hora de se montar

os gráficos. Com o auxílio do professor Gunter Gerhardt, [43] que utiliza o software próprio para realizar os cálculos e a montagem dos gráficos, este processo se tornou mais rápido.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através das medidas de dureza realizados nos corpos de prova do aço ABNT 1548, do aço ABNT 1045-1, 1045-2 e do aço ABNT 1050-1, 1050-2, 1050-3, bem como os ajustes e a determinação das camadas endurecidas. Medidas magnéticas para os toróides de aço ABNT 1548, e medidas não-destrutivas do ruído Barkhausen foram realizadas nos três aços. Além disso, serão apresentadas algumas discussões importantes acerca dos resultados obtidos no processo de tempera das amostras, que em muitos corpos de prova se demonstrou ineficiente para o propósito, das medidas de dureza e seus ajustes, medidas magnéticas importantes para comprovação das referências teórica e medidas de Barkhausen fundamental para determinação da camada temperada sem destruição da peça.

4.1 TORÓIDES DE AÇO ABNT 1548

Os toróides foram obtidos de virabrequins que receberam tempera superficial por indução. Neles foram realizadas medidas de dureza com um microdurômetro, medidas magnéticas com um traçador de curva de histerese (TCH) e medidas de Barkhausen com um conjunto de equipamentos mostrado no item 3.4.2. Para estas medidas utilizou-se dois jogos de amostras ambos com três corpos de prova, identificadas como A1 até A6.

4.1.1 Medidas de dureza aço ABNT 1548

Com as medições de dureza, realizadas com o microdurômetro, pode-se determinar qual a profundidade da camada endurecida, apesar deste processo ser destrutivo foi fundamental para uma primeira análise da camada temperada.

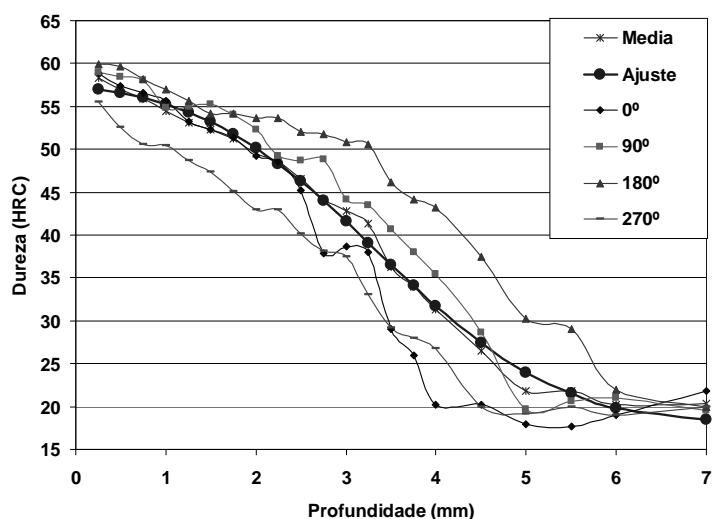


figura 4.1 – Perfis de dureza aço ABNT 1548, amostra A3

Com a análise das medidas (conforme item 3.2) pode-se afirmar que não existia uniformidade nas camadas endurecidas, ou seja, a profundidade da camada endurecida em um determinado perfil a 0° é diferente do medido em outro perfil a 90° que é diferente a 180° e diferentes em 270°, podem ver na Tabela 3 que não existia uniformidade.

Tabela 3 – Ajustes das curvas de dureza para o aço ABNT 1548

Amostra	λ_1	λ_2	C1	C2	Desvio padrão	Diferença em mm da média	Diferença % da média
A3-1548-0	2,91	1,55	20	18	0,68	-0,45	-13,4%
A3-1548-90	3,51	2,04	20	19		0,15	4,50%
A3-1548-180	4,25	2,37	20	19		0,89	26,5%
A3-1548-270	2,76	2,06	18	19		-0,60	-17,9%
A3-1548-média	3,36	2,23	20	18	-	-	-

4.1.2 Medida de histerese para toróides de aço ABNT 1548

Curvas de histerese magnética foram obtidas para frequências de 0,05-60 Hz com um TCH. Estas medidas foram cuidadosamente analisadas e nas frequências menores que 1Hz, a

ausência de correntes de Foucault permite ver claramente duas transições na curva de histerese. Assim pode-se afirmar com certeza que foi encontrada uma camada dura (campo coercivo alto) e outra mole (campo coercivo baixo). Um exemplo das medidas realizadas no TCH é mostrado na figura 4.2.

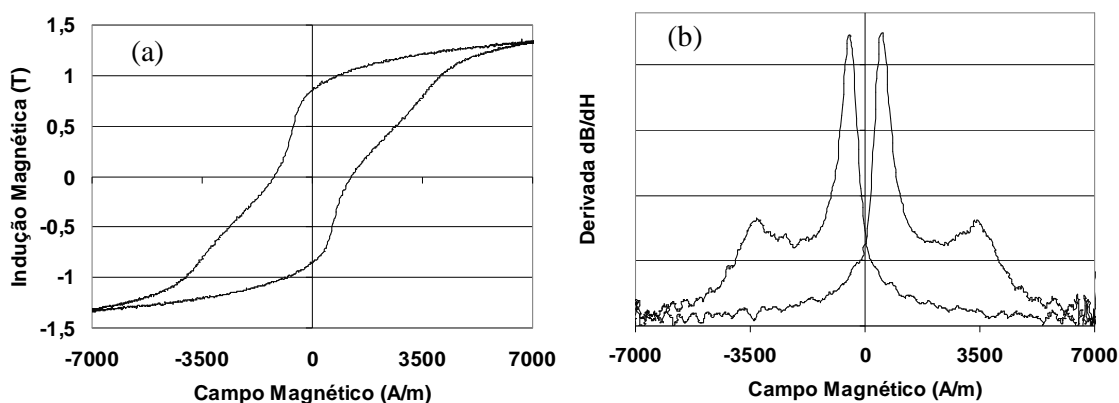


figura 4.2 – (a) Curva de histerese $f = 0,2$ Hz, (b) derivada da mesma curva, aço ABNT 1548

Para frequências abaixo de 1Hz, é possível notar a presença de duas transições. A derivada da curva de histerese mostra isto claramente. O pico maior, localizado em torno de $H=800$ A/m, corresponde ao sinal proveniente da ferrita no interior da peça, enquanto o pico menor, localizado em torno de $H=3500$ A/m, vem da camada dura na superfície (martensita). O estudo de toróides permite controlar as proporções relativas dos materiais duro e mole no corpo de prova. Além disso, permite determinar com certa precisão o campo coercivo associado com cada contribuição, uma vez que os campos magnéticos aplicados ao corpo de prova estão bem definidos.

4.1.3 Medidas de ruído Barkhausen

Medidas de RB foram realizadas nos seis toróides de aço ABNT 1548, que apesar de ter uma camada dura não uniforme, que foi determinada através das medidas de dureza, mostrou dois picos em campos magnéticos diferentes. Os resultados são mostrados na figura 4.3 onde podemos ver o envelope da tensão rms do primeiro pico de RB, aquele

correspondendo ao sinal que vem da parte mole do toróide o segundo pico corresponde a camada endurecida (martensita). Nota-se na figura 4.3 que os campos magnéticos associados com os picos de RB e H_{pico} são mais baixos do que os campos coercivos H_c apresentados na figura 4.2. Essa diferença entre os H_c e os H_{pico} foi notada no trabalho de Costa et al [40], e foi discutida em termos de um modelo por Kleber et al [36].

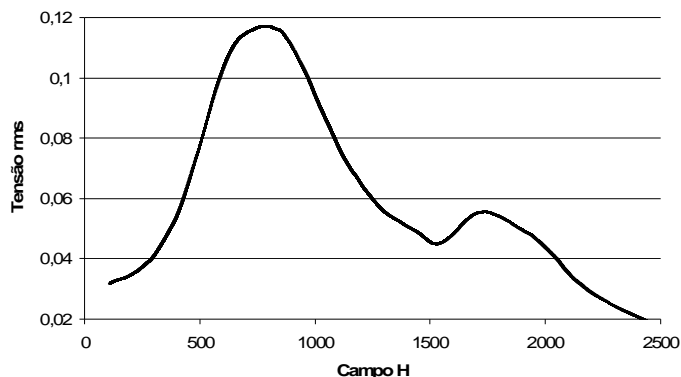


figura 4.3 – Dois picos de ruído Barkhausen em campos magnéticos distintos

Este resultado demonstra a possibilidade de aplicar medidas de ruído magnética de Barkhausen para determinar a espessura de uma camada dura na superfície. Para melhorar este resultado, umas séries de medidas devem ser tomadas para tornar a camada uniforme e podermos definir a camada pelo volume de cada parte.

Pode-se comparar este resultado da figura 4.3 e os dados de RB publicados por Kleber et al [35], (ver figura 2.18) onde ele mostra que o sinal da ferrita (material mole) encontra-se em baixos campos enquanto a contribuição de martensita (material duro) ocorre em altos campos. O aço C da figura 2.18 apresenta em sua composição 0,48% de carbono em peso. Assim ele é, entre os aços apresentado na figura 2.18, o que tem a composição mais semelhante com o aço ABNT 1548 utilizado neste trabalho (ver Tabela 4).

Tabela 4 – Composição dos aços

Aços	Carbono (C)	Manganês (Mn)	Fósforo (P)	Enxofre (S)
Aço ABNT 1548	0,46-0,50	1,10-1,40	0,040	0,050
Aço C	0,48	0,65	0,012	0,030

Saquet [38] em sua publicação mostra medida de ruído Barkhausen com dois picos (ver figura 2.19) correspondente ao material mole e a camada endurecida. Ele faz uma relação entre a amplitude dos picos e o volume de cada parte. Como as amostras de aço ABNT 1548 não apresentam uniformidade se torna inviável o cálculo dos volumes e sua relação com os sinais de ruído Barkhausen.

4.2 CILINDROS E DISCOS DE AÇO ABNT 1045 E 1050

Nesta seção começa-se apresentando resultados para os perfis de dureza em cilindros de aço ABNT 1045 e 1050. Para cada tipo de aço, dois cilindros foram preparados com têmpera superficial por indução. Os mesmos tratamentos foram realizados nos dois cilindros, criando regiões endurecidas com quatro espessuras diferentes. Um cilindro foi mantido intacto para medidas do ruído Barkhausen, enquanto o outro foi cortado para medidas de dureza.

4.2.1 Medidas de dureza

Para o primeiro conjunto de amostra 1045-1 e 1050-1, após serem realizadas todas as medidas de dureza, os ajustes (conforme item 3.2) e analisadas estas medidas, pode-se constatar que não existia uniformidade nas camadas endurecidas (ver Tabela 5).

Tabela 5 – Ajustes das curvas de dureza para os discos de aço ABNT 1045 e 1050 amostra 01

Amostra	λ_1	λ_2	C1	C2	Desvio padrão	Diferença em mm da media	Diferença % da media
1045-1-0	2,97	1,90	21,0	18,5	0,77	-0,27	-8,47%
1045-1-90	2,38	1,57	21,5	17,0		-0,87	-26,78%
1045-1-180	3,84	2,48	21,0	17,0		0,60	18,38%
1045-1-270	4,04	1,88	18,5	20,0		0,80	24,53%
1045-1-media	3,24	2,02	19,5	19,0	-	-	-
1050-1-0	2,71	2,25	22,0	19,5	0,72	-0,54	-16,49%
1050-1-90	2,38	1,50	21,0	17,5		-0,86	-26,64%
1050-1-180	3,65	2,67	24,0	15,0		0,41	12,61%
1050-1-270	3,87	2,63	20,0	20,0		0,62	19,18%
1050-1-media	3,24	2,02	19,5	19,0			

O desvio padrão era grande, portanto, não serviam para tal propósito, pois para determinar-se a profundidade da camada endurecida precisa-se de camadas uniformes. Este conjunto de amostras foram descartados.

O segundo grupo de amostras (1045-2 e 1050-2), apresentaram uma boa uniformidade em suas camadas, sendo os mesmos utilizados para determinar a profundidade da camada endurecida através da medição da dureza e do ruído Barkhausen.

Porém as quatro camadas que foram criadas apresentaram uma profundidade entre 2,5 e 5,5 mm enquanto esperava-se camadas mais finas e com variações mais uniformes entre elas.

Como pode ser visto nas figuras 4.4 e 4.5 e tabelas 6, onde são apresentadas medidas de dureza ao longo de quatro direções ortogonais, a camada superficial possui boa uniformidade. Para o corpo de prova de aço 1045-2-1, a espessura é de 2,63mm +/- 0,04mm enquanto para 1050-2-1 é 3,61 +/- 0,07mm.

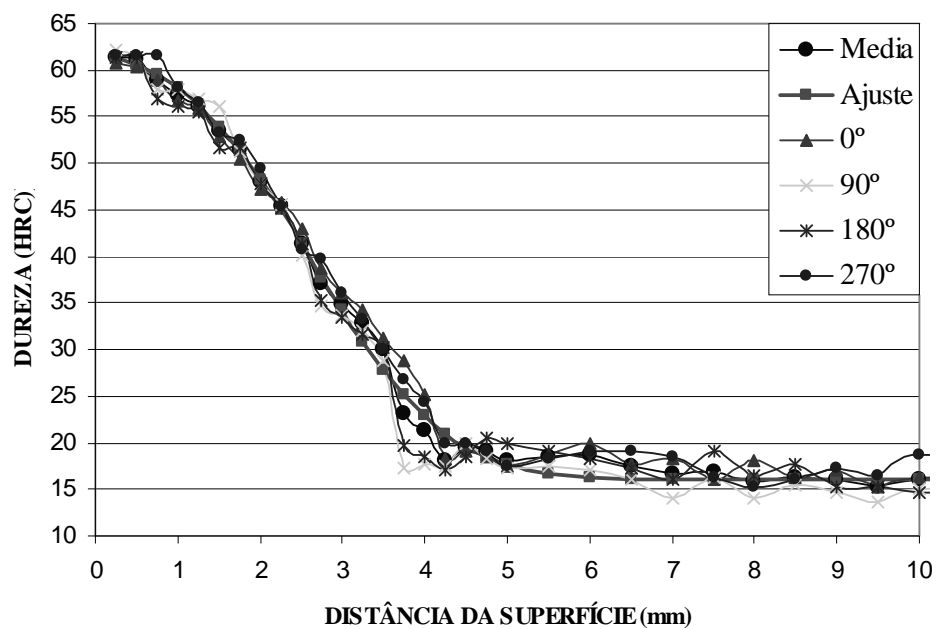


figura 4.4 - Perfis de dureza aço 1045-2-1 ao longo de quatro direções ortogonais

Tabela 6 - Ajustes das curvas de dureza de um disco de aço 1045-2-1 e um de aço 1050-2-1

Amostra	λ_1	λ_2	C1	C2	Desvio padrão	Diferença em mm da media	Diferença % da media
1045-2-1-0°	2,66	1,97	23	17	0,032	0,03	1,14%
1045-2-1-90°	2,60	1,67	24	15		-0,03	-1,14%
1045-2-1-180°	2,59	1,89	24	15		-0,04	-1,52%
1045-2-1-270°	2,63	1,89	23,5	17		0,00	0,00%
1045-2-1-media	2,63	1,84	23,5	16	-	-	-
1050-2-1-0°	3,68	1,07	19	22	0,044	0,07	1,94%
1050-2-1-90°	3,59	1,00	19	22		-0,02	-0,55%
1050-2-1-180°	3,59	0,99	19	22		-0,02	-0,55%
1050-2-1-270°	3,60	1,03	19	22		-0,01	-0,28%
1050-2-1-media	3,61	1,02	19	22	-	-	-

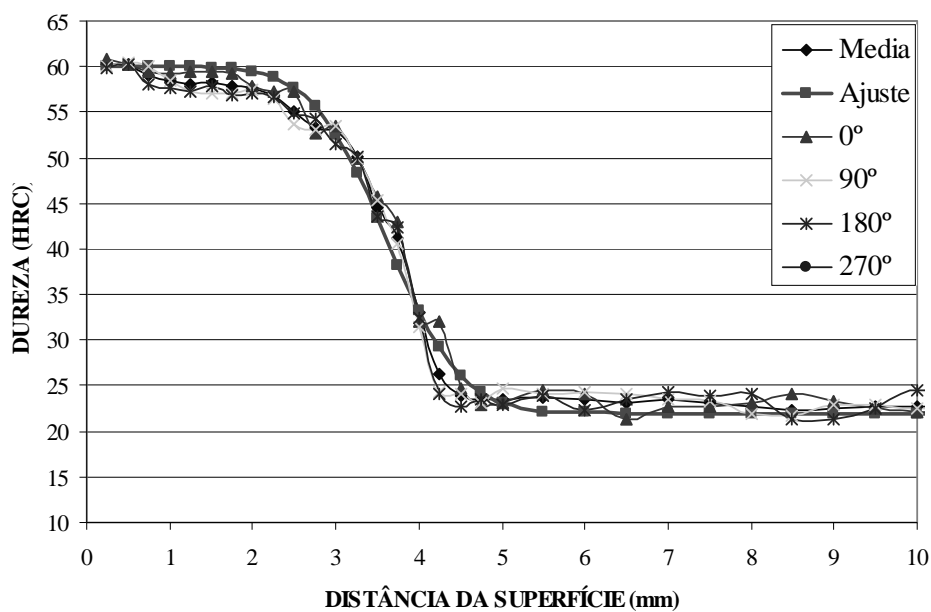


figura 4.5 - Perfis de dureza aço 1050 ao longo de quatro direções ortogonais

Na Tabela 7 e figura 4.6 podemos ver a profundidade das camadas das amostras 1045-2 onde foram realizadas medidas nos quatro discos identificados como 1045-2-1, 1045-2-2, 1045-2-3 e 1045-2-4.

Foi considerado como final da camada endurecida o ponto onde a diferença entre a dureza da superfície e do núcleo cai pela metade (λ_1). Com a análise dos dados (descrita na

seção 3.2) verificou-se que o disco 1045-2-1 apresenta uma camada de $\lambda_1=2,63\text{mm}$, o disco 1045-2-2 apresenta uma camada de $\lambda_1=3,06\text{mm}$, o disco 1045-2-3 apresenta uma camada de $\lambda_1=3,43\text{mm}$ e o disco 1045-2-4 apresenta uma camada de $\lambda_1=4,17\text{mm}$.

Tabela 7 – Ajustes das curvas de dureza para os discos de aço ABNT 1045, amostra 2

Amostra	λ_1	λ_2	C1	C2
1045-2-1	2,63	1,84	23,50	16
1045-2-2	3,06	3,01	21,50	19
1045-2-3	3,43	1,89	22	15
1045-2-4	4,17	2,04	20,50	17

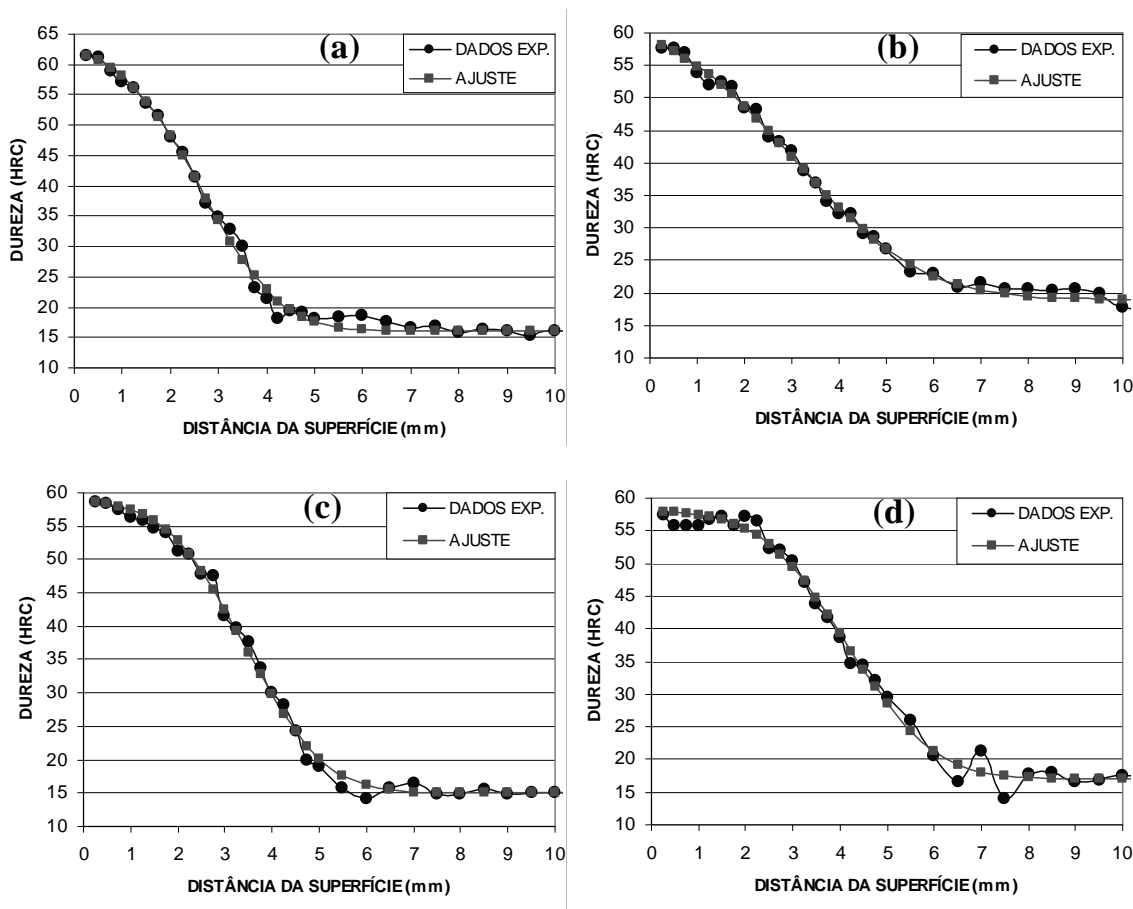


figura 4.6 – Medidas de dureza dos discos de aço ABNT 1045 (a) amostra 1045-2-1, (b) amostra 1045-2-2, (c) amostra 1045-2-3, (d) amostra 1045-2-4.

Na Tabela 8 e figura 4.7 pode-se ver a profundidade das camadas das amostras 1050-2 onde foram realizadas medidas nos quatro discos identificados como 1050-2-1, 1050-2-2,

1050-2-3 e 1050-2-4.

Com a análise dos dados (descrita na seção 3.2) verificou-se que o disco 1050-2-1 apresenta uma camada de $\lambda_1=3,58\text{mm}$, o disco 1050-2-2 apresenta uma camada de $\lambda_1=3,91\text{mm}$, o disco 1050-2-3 apresenta uma camada de $\lambda_1=4,14\text{mm}$ e o disco 1050-2-4 apresenta uma camada de $\lambda_1=5,57\text{mm}$.

Tabela 8 – Ajustes das curvas de dureza para os discos de aço ABNT 1050, amostra 2

Amostra	λ_1	λ_2	C_1	C_2
1050-2-1	3,58	0,96	18,50	23
1050-2-2	3,91	0,94	16,50	25
1050-2-3	4,14	1,35	17,00	24
1050-2-4	5,57	1,25	17,50	25

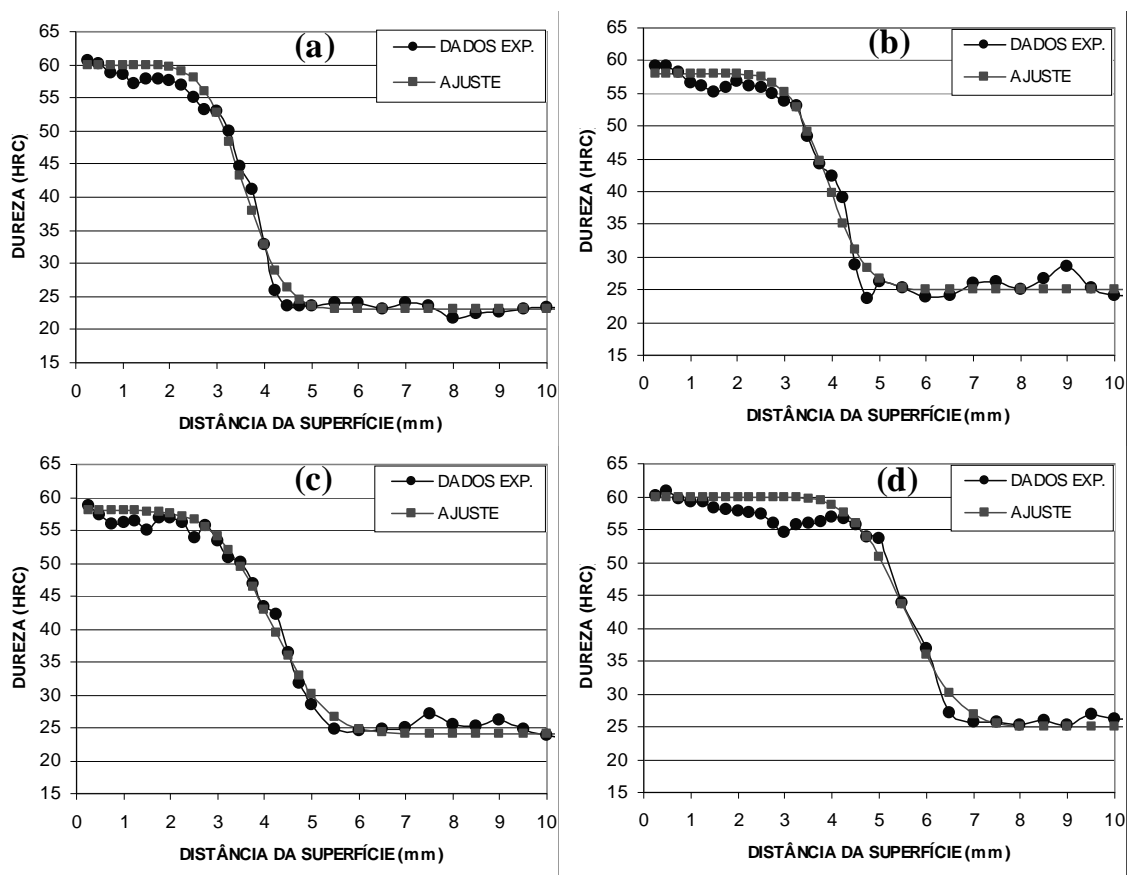


figura 4.7 – Medida de dureza dos discos de aço ABNT 1050, (a) amostra 1050-2-1, (b) amostra 1050-2-2, (c) amostra 1050-2-3, (d) amostra 1050-2-4.

Um terceiro conjunto de amostra (1050-3) foi fabricado na Sufran, para se tentar obter camadas mais finas (de 0,5mm a 2mm), após ser realizadas todas as medidas de dureza, realizado os ajustes (conforme item 3.2) e analisadas estas medida, pode-se constatar que não existia uniformidade nas camadas endurecidas (ver Tabela 9). O desvio padrão era grande, portanto, não serviam para nosso propósito, pois para determinar-se a profundidade da camada endurecida precisa-se de camadas uniformes. Em uma conversa com representantes da empresa Sufran, onde foram apresentadas as medidas de dureza, eles justificaram que o seu equipamento de têmpera por indução tinha chegado ao limite e não poderia fabricar com uniformidade camadas tão finas e sugeriram uma têmpera por cementação ou um equipamento melhor do que eles possuem. Este conjunto de amostras também foi descartado.

Tabela 9 – Ajuste da curva de dureza para o disco de aço 1050-3

Amostra	λ_1	λ_2	C_1	C_2	Desvio padrão	Diferença em mm da media	Diferença % da media
1050-3-0	0,85	0,30	16	23	0,40	0,08	9,68
1050-3-90	1,30	0,30	17,2	23		0,53	67,74
1050-3-180	0,55	0,20	17,3	24		-0,23	-29,03
1050-3-270	0,40	0,10	7,5	23		-0,38	-48,39
1050-3-media	0,78	0,23	14,5	23,3	-	-	-

4.2.2 Medidas de ruído Barkhausen

Medidas de RB foram realizadas ao longo do cilindro de aço ABNT 1045 com um intervalo de dois milímetros entre medidas, foi dada uma especial atenção nas quatro regiões com superfície endurecida (designadas 1045-2-1, 1045-2-2, 1045-2-3 e 1045-2-4) e também numa região do cilindro onde não havia camada dura na superfície (1045-2-0). Os resultados são mostrados na figura 4.9 onde pode-se ver o envelope da tensão rms associado ao primeiro pico de RB, aquele correspondendo ao sinal que vem do núcleo mole do cilindro em função do campo magnético ao longo do cilindro. Para o eixo vertical do gráfico as unidades são relativas, enquanto para o eixo horizontal temos a posição ao longo do cilindro em mm.

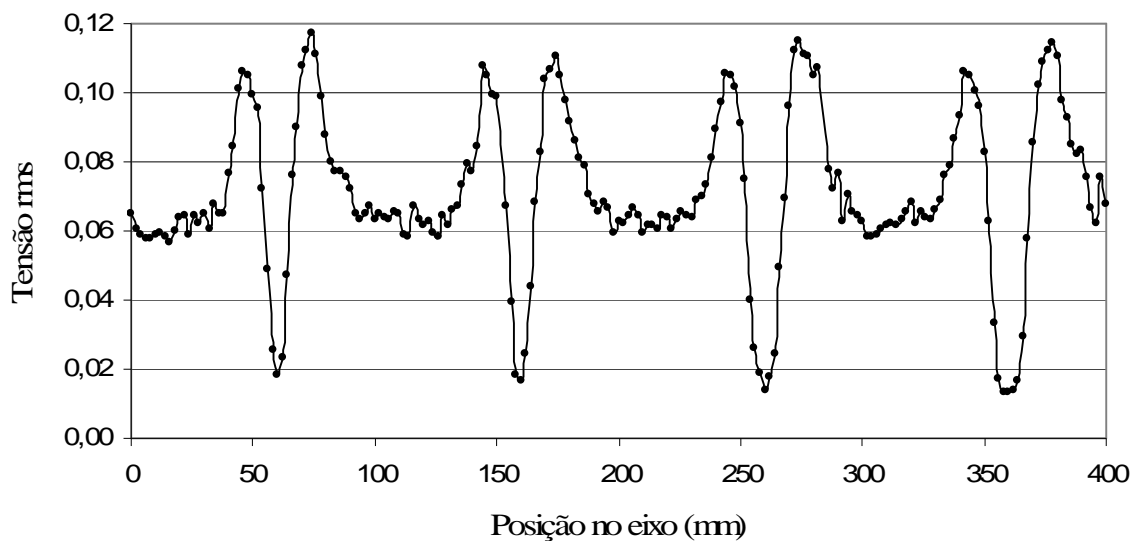


figura 4.8 – Cilindro de aço ABNT 1045 com quatro regiões endurecidas

Na figura 4.10 foram destacadas apenas as regiões com superfície endurecida e uma região sem camada endurecida, onde pode-se ver melhor o valor da tensão rms.

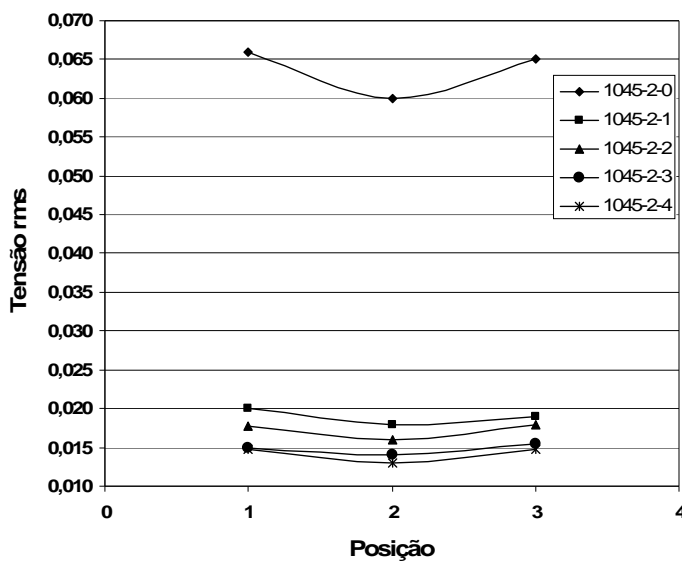


figura 4.9 – Tensão rms do RB nas camadas endurecidas, amostra 1045-2.

Medidas de RB foram realizadas ao longo do cilindro de aço 1050 com um intervalo de dois milímetros entre medidas, foi dada uma especial atenção nas quatro regiões com superfície endurecida (designadas 1050-2-1, 1050-2-2, 1050-2-3 e 1050-2-4) e também numa

região do cilindro onde não havia camada dura na superfície (1050-2-0).

Os resultados são mostrados na figura 4.11 abaixo onde podemos ver o envelope da tensão rms associado ao primeiro pico de RB, aquele correspondendo ao sinal que vem do núcleo mole do cilindro em função do campo magnético. Para o eixo vertical do gráfico as unidades são relativas, enquanto para o eixo horizontal temos a posição ao longo do cilindro em mm.

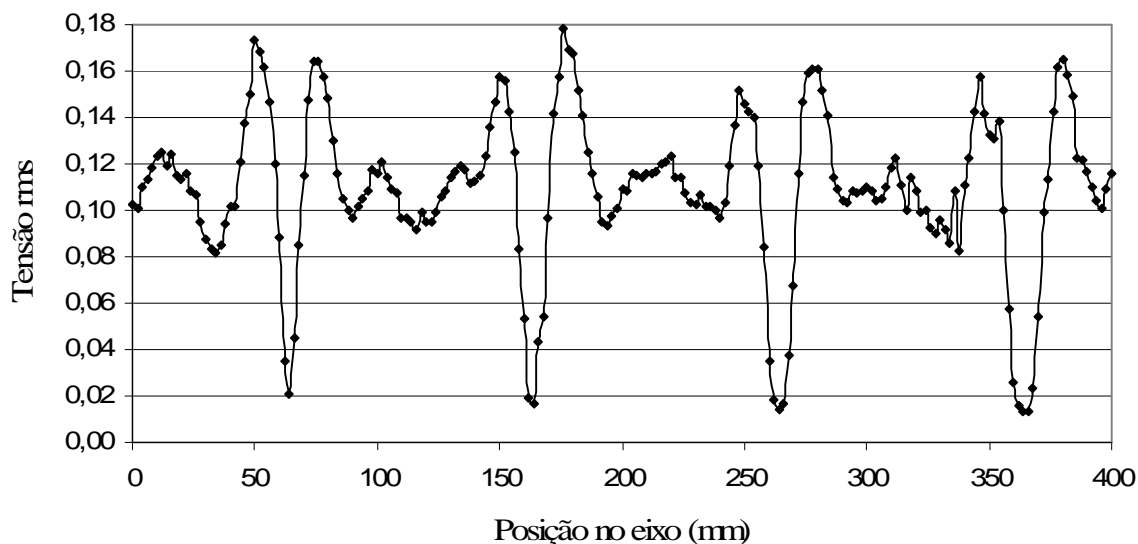


figura 4.10 – Cilindro de aço ABNT 1050 com quatro regiões endurecidas

Na figura 4.12 foi destacada apenas as regiões com superfície endurecida onde pode-se ver melhor o valor da tensão rms.

Nesta figura o ruído eletrônico está com um valor em torno de 0,01. Os sinais provenientes de corpos de prova com camadas mais profundas devem ter seus valores influenciados pelo ruído de fundo. Além disso, o valor máximo de RB ocorre em campos magnéticos ligeiramente maiores para camadas mais espessas.

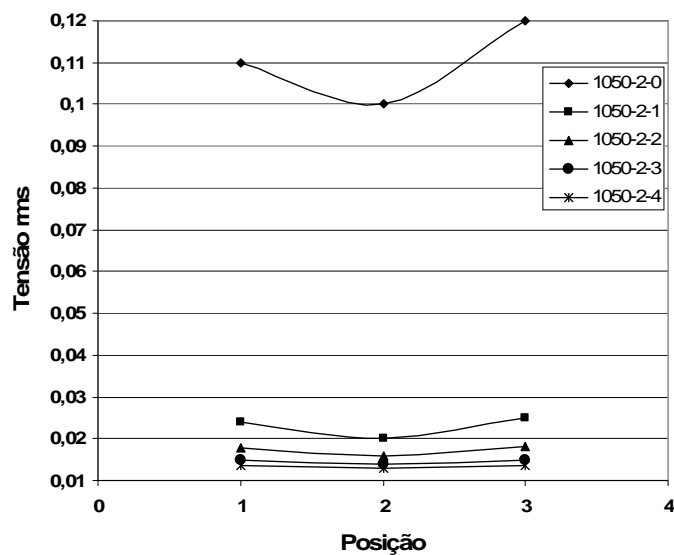


figura 4.11 - Tensão rms do RB nas várias camadas endurecidas, amostra 1050-2.

Porém, pode-se fazer um gráfico dos valores de pico de RB em função da espessura estimada da camada dura do aço 1045-2, obtendo o resultado apresentado na figura 4.12. A linha ligando os pontos está presente apenas para guiar o olho.

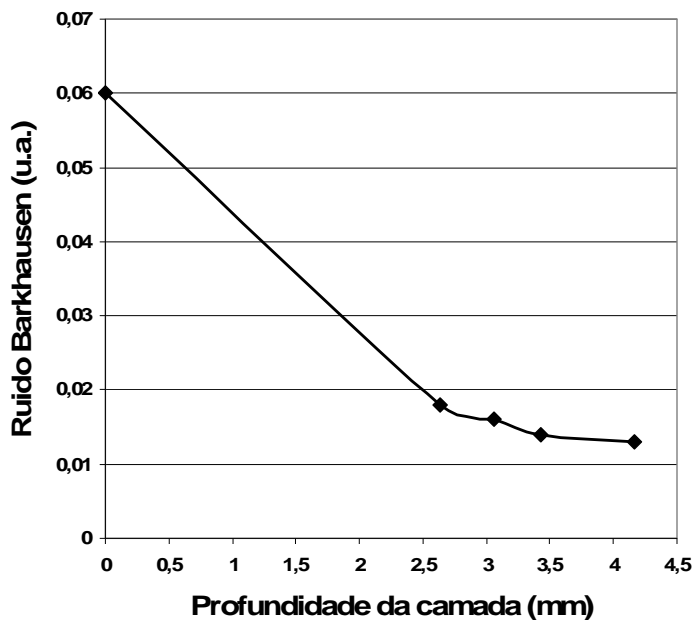


figura 4.12 – Sinal Barkhausen vs. espessura da camada endurecida, aço ABNT 1045

Pode-se fazer um gráfico dos valores de pico de RB em função da espessura estimada da camada dura do aço 1050-2, obtendo o resultado apresentado na figura 4.13. A linha ligando os pontos está presente apenas para guiar o olho.

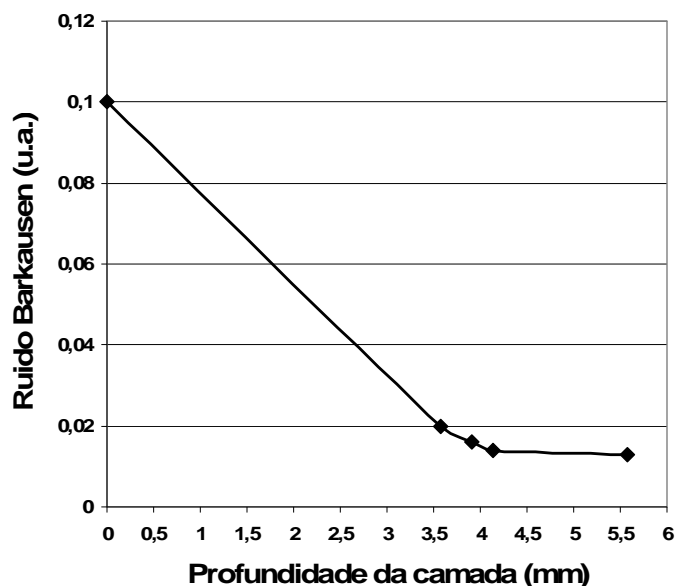


figura 4.13 – Sinal Barkhausen vs. espessura da camada endurecida, aço ABNT 1050

Este resultado demonstra a possibilidade de aplicar medidas de ruído magnética de Barkhausen para determinar a espessura de uma camada dura na superfície de um cilindro de aço 1045 e 1050, pelo menos para camadas finas. Para melhorar este resultado, umas séries de medidas devem ser tomadas para aumentar o sinal proveniente do núcleo mole da peça.

O uso de RB para medir a espessura de uma camada na superfície de um aço depende da possibilidade de observar sinais RB tanto da superfície como do núcleo do material. Medidas de RB, em princípio, tem um alcance muito grande. Valores calculados a partir da equação clássica para a distância de penetração (skin depth):

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad (2)$$

onde f é a frequência, σ é a condutividade, e μ é a permeabilidade do material em

questão, fornecem uma maneira de estimar a distância de penetração. De fato, as grandezas nesta equação frequentemente são difíceis de determinar, especialmente num corpo de prova multifásico. De qualquer forma, uma primeira providência a ser tomada seria examinar ruído Barkhausen correspondendo a frequências mais baixas. A utilização de uma baixa frequência também foi enfatizada por Nummila et al. [15]. Ele também insistiu na necessidade de otimizar o valor do campo magnético usado para a medida, no sentido de aplicar campos magnéticos suficientemente altos para observar o núcleo da peça mas não suficiente para obter um sinal da superfície da peça. Desta forma, o ruído estudado seria proveniente somente do núcleo mole da peça [15]. Finalmente, é importante reconhecer que a curva da figura 4.13 vale somente para as condições daquela medida.

5 CONCLUSÃO

Foi produzido por aquecimento indutivo, camadas duras na superfície de cilindros de aço 1045, 1050, e 1548. Medidas de microdureza mostraram que as espessuras das camadas eram razoavelmente uniformes em um conjunto de amostras de aço 1045 e 1050. Medidas de curvas de histerese mostram duas transições magnéticas. O pico maior na susceptibilidade magnética, localizado em torno de $H = 800$ A/m, corresponde ao sinal proveniente do interior da peça, enquanto o pico menor, localizado em torno de $H = 3500$ A/m, vem da camada dura na superfície. Utilizando um yoke/sensor em bom contato com a superfície do cilindro, foi possível observar ruído magnético de Barkhausen proveniente do núcleo mole do cilindro, bem como, uma relação aproximadamente linear entre a amplitude do sinal Barkhausen e a espessura estimada da camada dura. Finalmente, comentou-se a necessidade de aumentar a razão sinal/ruído para tornar este método mais sensível. Uma maneira de aumentar a razão sinal/ruído seria usar frequências mais baixas para as medidas.

Convém enfatizar-se certos pontos em relação ao trabalho realizado. A partir das medidas magnéticas, conclui-se que os materiais magneticamente moles (ferrita) são encontrados em baixos campos e apresentam maiores amplitudes de sinal Barkhausen. Já os materiais duros (martensita) encontram-se em altos campos e apresentam baixa amplitude. Estas informações foram de fundamental importância para o desenvolvimento dos sensores para captar o sinal Barkhausen. É complicado desenvolver um sistema de excitação magnética para obter um sinal Barkhausen em baixos e altos campos para fazer uma relação entre os dois

sinais (material duro e mole) conforme SAQUET [38]. Preferiu-se realizar as medidas em campos baixos procurando medir apenas a ferrita e fazer uma relação entre a amplitude do sinal Barkhausen e a dureza medida com o microdurometro.

As medidas de Barkhausen mostram a relação existente entre a espessura da camada endurecida e a amplitude do sinal Barkhausen. Em resumo, as medidas de ruído Barkhausen revelaram que a amplitude do sinal é atenuada pelo aumento da espessura da camada temperada. Além disso a faixa de frequência dos sinais analisados também altera a amplitude do sinal.

A continuidade do trabalho se dará de forma a estudar aços com outras espessuras de camadas na superfície. Por exemplo, o processo de cementação é capaz de produzir camadas duras entre 0,2 e 1,4 mm na superfície de uma peça. Além disso, a utilização de frequências mais baixas pode ser interessante. Filtros eletrônicos que permitem a escolha da faixa de frequência a ser utilizada estão sendo importados com recursos da Secretaria de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 MARU, M., MACHADO, R., ACHETE, C. A., ZEILMANN, R. P., OLIVEIRA, J. R., COGORNI, H. F., MISSELL, F. P., PADOVESE, L. R., FIX, R. M. Residual stresses in AISI H13 steel after high speed machining Proceedings. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON BARKHAUSEN NOISE AND MICROMAGNETIC TESTING**, 6º, 2007, Valenciennes, França.
- 2 SILVA, G. R., BAIOTTO, R., ZEILMANN, R. P., MISSELL, F. P. Caracterização magnética de aço com a superfície endurecida. In: **ABM INTERNATIONAL CONGRESS**, 65º, 2010, Rio de Janeiro. pp. 1438-1445.
- 3 BOHN, F. **Magnetostricção e ruído Barkhausen em aços elétricos de grão não-orientado**. Santa Maria: UFSM, 2005. Tese (mestrado em Física), Universidade Federal de Santa Maria, 2005.
- 4 DENARDIN, J. C. **Efeitos da tensão mecânica no ruído barkhausen em fitas magnéticas amorfas**. Santa Maria: UFSM, 1998. Tese (mestrado em Física), Universidade Federal de Santa Maria, 1998.
- 5 SERNA-GIRALDO, C. P. **Avaliação de juntas soldadas de aço carbono através de ruído magnético de Barkhausen**. São Paulo: USP, 2007. Tese (doutorado em engenharia), Universidade de São Paulo, 2007.
- 6 TIPLER, P. A. **Física-para cientistas e engenheiros**. 5ed, São Paulo: LTC, 2006.
- 7 CULLITY, B. D. **Introduction to Magnetic Materials**, Addison-Wesley, USA, 1972.
- 8 JILES, D. **Introduction to magnetism and magnetic materials**. New York: Chapman and Hall, 1998.
- 9 O'HANDLEY, R. C. **Modern Magnetic Materials**. New York: Wiley-Interscience. 2000.
- 10 JILES, D. C. Review of magnetic methods for non-destructive evaluation. *NDT International* v. 21, pp. 311-319, 1988.
- 11 BACH, G., GOEBBELS, K., e THEINER, W. A. Characterization of hardening depth by Barkhausen noise measurement. *Mater. Eval.* v. 46, pp. 1576-1580, 1988.
- 12 DUBOIS, M. e FISET, M. Evaluation of case depth on steels by Barkhausen noise measurement *Mater. Sci. Technol.* v. 11, pp. 264-267, 1995.

- 13 VAIDYANATHAN, S., MOORTHY, V., JAYAKUMAR, T., RAJ, B. Evaluation of induction hardened case depth through microstructural characterization using magnetic Barkhausen emission techniques. *Mater. Sci. Technol.* v. 16, pp. 202-208, 2000.
- 14 JILES, D. C., KERN, R., THEINER, W. A. Evaluation of surface modifications in high strength steels. *Nondestructive Testing & Evaluation* v. 10, pp. 317-331, 1993.
- 15 NUMMILA, K., SEPPÄ, H., VARPULA, T. Method for determining the hardening depth of steel. **US Patent 7259555**, August 21, 2007.
- 16 MOORTHY, V., SHAW, B.A., DAY, S. Evaluation of applied and residual stresses in case-carburised En-36 steel subjected to bending using the magnetic Barkhausen technique. *Acta Materialia* v. 52, pp.1927–1936, 2004.
- 17 ZHANG, C., BOWLER, N., LO, C. Magnetic characterization of surface-hardened steel. *J. Magn. Magn. Mater.* v. 321, pp. 3878-3887, 2009.
- 18 LO, C. C. H., KINSER, E. R., MELIKHOV, Y., JILES, D. C. Magnetic non-destructive characterization of case depth in surface-hardened steel components. *AIP Conf. Proc.* v. 820, pp. 1253-1260, 2006.
- 19 JOHNSON, M., LO, C., HENTSCHER, S., KINSER, E. Analysis of conductivity and permeability profiles in hardened steel. *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (IX)*, eds. UDPA, L. e BOWLER, N. (IOS Press, 2005) pp. 135-142.
- 20 BOWLER, J. R., HUANG, Y., SUN, H., BROWN, J., BOWLER, N. Alternating current potential-drop measurement of the depth of case hardening in steel rods. *Meas. Sci. Technol.* v. 19, 075204 (8pp), 2008.
- 21 PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia – Microestrutura e Propriedades**. Editora Hemus, 2000.
- 22 CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2002.
- 23 BERTOTTI, G., “Hysteresis in Magnetism”, **Academic press**, 1998.
- 24 LANDGRAF, F. J. G. . Propriedades Magnéticas de aços para fins elétricos. In: Ivani Bott; Paulo Rios; Ronaldo Paranhos. **Aços: perspectivas para os próximos 10 anos**, 1a ed., Rio de Janeiro, pp. 109-128. 2002.
- 25 BERTOTTI, G., “General properties of power losses in soft ferromagnetic materials”, **IEEE Transactions on Magnetics** vol. 21, pp. 621-630, 1988.
- 26 FIORILLO, F., “DC and AC magnetization processes in soft magnetic materials”, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials** vol. 242–245, pp. 77–83. 2002.
- 27 BERTOTTI, G., “Connection between microstructure and magnetic properties of soft magnetic materials”, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials** vol. 320, pp. 2436–2442. 2008
- 28 SILVA, A. L. V. da C.; MEI, P.R. **Aços e Ligas Especiais**. 2º Edição, Editora Blucher, 2008.
- 29 HONEYCOMBE, R. W. K.; BHADESHIA, H. K. D. H. Steels. **Microstructure and Properties**. Londres: Edward Arnold, 1995.
- 30 CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 4. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1979.
- 31 CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica – Processos de Fabricação e Tratamento**. , 2. ed. São Paulo: Editora McGraw-Hill, 1986.

- 32 LINO, F. J. **Ensaio de Dureza**. <http://paginas.fe.up.pt/~falves/Ensaiodureza.pdf>, acessado em 23/06/2010
- 33 ASM Handbook Committee. **Mechanical Testing and Evaluation**. ASM Metals HandBook Volume 8 - Mechanical Testing and Evaluation, 2000.
- 34 SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**, 5ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1982.
- 35 KLEBER, X., A. HUG, J. MERLIN and M. SOLER. Ferrite–Martensite Steels Characterization Using Magnetic Barkhausen Noise Measurements. **ISIJ International**, Vol. 44, N. 6, p. 1033–1039, 2004.
- 36 KLEBER, X.; HUG-AMALRIC, A. and MERLIN, J. Evaluation of the Proportion of Phases and Mechanical Strength of Two-Phase Steels Using Barkhausen Noise Measurements: Application to Commercial Dual-Phase Steel. **Metallurgical and Materials Transactions A**, Volume 39, 6ª ed. Pag.1308-1318. 2008.
- 37 GÜR, C. H.; İBRAHİM, Ç. Comparison of Magnetic Barkhausen Noise and Sound Velocity Measurements for Characterisation of Steel Microstructures. **Materials Characterization**, Volume 58, 5ª ed, Pág. 447-454, 2007.
- 38 CAPÓ-SÁNCHEZ, J.; PÉREZ-BENITEZ, J. A.; PADOVESE, L. R.; SERNA-GIRALDO, C. Dependence of the magnetic Barkhausen emission with carbon content in commercial Steels. **Journal of Materials Science**, Volume 39, Nº 4, Pag. 1367-1370, 2004.
- 39 SAQUET O. Le bruit Barkhausen : technique de contrôle et d'évaluation non destructive, **Techniques de l'ingénieur . Mesures et controles**, 1998.
- 40 CORSON, DALE. LORRAIN, PAUL. **Introduction to electromagnetic fields and waves**. San Francisco: W.H. Freeman and Company, 1962.
- 41 COSTA. L. F. T., GIROTTO, F., BAIOTTO, R., GERHARDT, G., CAMPOS, M. F., MISSELL, F. P. Influence of microstructural constituents on the hysteresis curves in 0.2%C and 0.45%C steels. In: **JOINT EUROPEAN MAGNETICS SYMPOSIUM**, Cracôvia, Polônia, agosto de 2010 e submetido para publicação em *Journal of Physics: Conference Proceedings*.
- 42 COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3ªed. São Paulo, Edgard Blücher, 1974.
- 43 Gunther J. L. Gerhardt, comunicação particular.

