

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE INSPEÇÃO DE DEFEITOS SUPERFICIAIS EM UMA
LINHA DE INSPEÇÃO DE BARRAS DE AÇO LAMINADO

por

Leonardo Silveira

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Junho de 2018



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE INSPEÇÃO DE DEFEITOS SUPERFICIAIS EM UMA
LINHA DE INSPEÇÃO DE BARRAS DE AÇO LAMINADO

por

Leonardo Silveira

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez

Comissão de Avaliação:

Prof. Patric Daniel Neis

Prof. Cíntia Cristiane Petry Mazzaferro

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez

Porto Alegre, 14 de Junho de 2018.

SILVEIRA, L. **Influência dos Parâmetros de Inspeção de Defeitos Superficiais em uma Linha de Inspeção de Barras de Aço Laminado**. 2018. 22 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar dois parâmetros – nível de inspeção e Supressão de Defeitos Curtos – de controle do processo de inspeção de defeitos superficiais em barras de aço laminado pelo método de Fuga de Campo Magnético. Isso é realizado com o fim de atingir, através do uso desses parâmetros, uma redução no índice de detecção de defeitos falsos, sem deste modo aumentar o número de erros por não detecção de defeitos verdadeiros. Isso foi realizado mediante a aplicação do projeto de experimentos fatorial 3^2 , utilizando uma amostra de barras de aço laminado contendo 21 defeitos, e posterior análise desses defeitos através do ensaio não destrutivo de Partícula Magnética e análise micrográfica. Quatro características dos defeitos foram avaliadas: profundidade, comprimento, abertura na superfície e ângulo de entrada no material, porém destes, apenas a profundidade foi utilizada para determinar se o defeito deveria ou não ser detectado. Os resultados mostram que apenas o parâmetro Supressão de Defeitos Curtos foi significativo para a alteração das respostas Erro de Detecção e Erro de Não Detecção de defeitos, e que com a utilização desse parâmetro consegue-se obter uma redução de detecção de defeitos falsos. Porém, invariavelmente foi obtido como subproduto disso o aumento dos erros de não detecção de defeitos verdadeiros pelo método de inspeção.

PALAVRAS CHAVE

Barras de aço laminado, defeitos superficiais, Fuga de Campo Magnético, supressão de defeitos curtos.

SILVEIRA, L. **Influence of Superficial Defects Inspection Parameters in a Rolled Steel Bar Inspection Line**. 2018. 22 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

The aim of this study is to evaluate two parameters – Inspection Threshold and Short Flaw Suppression – of control in the process of inspection of superficial defects in rolled steel bars using the Magnetic Flux Leakage method. This is accomplished with the objective of by the use of these parameters reduce the false defect detection index, but without thereby increasing the number of errors made by not detecting true defects. The study was carried out using the 3^2 factorial design of experiment, utilizing a sample of rolled steel bars containing 21 defects, and posterior analysis of the defects using the non-destructive magnetic particle testing and micrographic analysis. Four features of the defects were assessed: depth, length, width, and entrance angle in the surface of the material, but of these, only depth was used to determine if the defect should or should not be detected. The results show that only the parameter Short Flaw Suppression is significant for the change in the evaluated responses, and with the use of this parameter it is feasible a reduction in the detection of false defects. However, invariably was obtained as a sub product of this result an increase in the number of errors of non-detection of true defects by the inspection method.

KEYWORDS

Rolled steel bars, superficial defects, Magnetic Flux Leakage, short flaw suppression.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	1
2.1.	Defeitos superficiais	1
2.1.1.	Defeito tipo Trinca	2
2.1.2.	Defeito tipo Escama	2
2.1.3.	Defeito tipo Dobra	3
2.2.	Ensaio não destrutivo	3
2.2.1.	Fuga de Campo Magnético	3
2.2.1.1.	Aplicação em Barras Laminadas de Aço	4
2.2.1.2.	Geometria dos Defeitos.....	5
2.3.2.	Partícula Magnética.....	6
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	6
3.1.	Definição do aço e seleção da amostra.....	6
3.2.	Inspeção por Fuga de Campo Magnético.....	7
3.2.1.	Supressão de Defeitos Curtos.....	8
3.3.	Projeto de experimento – Fatorial 3 ²	9
3.4.	Inspeção por Partícula Magnética e Corte de Amostras.....	10
3.5.	Análise Metalográfica dos defeitos	11
4.	RESULTADOS	11
5.	CONCLUSÕES	14
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
Apêndice A	16

1. INTRODUÇÃO

A partir do início do século XXI, a consolidação de um mercado globalizado trouxe a entrada de novos competidores a mercados antes não alcançados. Tratando-se do setor siderúrgico, o movimento de maior destaque foi a entrada de produtos chineses na Europa e América. A competição com a indústria chinesa produziu excesso na oferta de aço, reduzindo os preços de venda para faixas próximas ao custo do produto (Passos e Maciel, 2017).

Dentro do setor siderúrgico, porém, o nicho de aços especiais, caracterizados por faixas de composição química mais estreitas, com maior número e porcentagem de elementos de liga e usualmente para emprego em peças e componentes expostos a esforços de fadiga, se destaca como uma frente de mercado onde é possível haver diferenciação do produto, não se restringindo apenas na batalha pelo menor preço de venda. Essa característica é derivada da necessidade de controle rigoroso da qualidade de fabricação desse aço, uma vez que devido a sua aplicação a existência de defeitos pode ter graves consequências no seu uso final (Hexsel, 2012).

Devido à importância do fator qualidade e da característica inerente do processo siderúrgico de geração de defeitos, usinas siderúrgicas produtoras de aços especiais comumente devem submeter cem por cento de seus produtos à inspeção, de modo a evitar que produtos defeituosos sejam enviados ao cliente. Uma maneira de atingir esse objetivo é por meio de linhas de inspeção automáticas de defeitos, aplicando métodos não destrutivos de avaliação.

De modo a conseguir uma inspeção segura e produtiva, deve-se ter como meta um processo preciso e exato, que detecte apenas os defeitos acima da tolerância exigida pelo cliente. Assim, evita-se o trabalho em re-inspecionar um produto conforme, gerar paradas nas linhas de inspeção, remover desnecessariamente defeitos abaixo da tolerância e aumentar o tempo de produção (*lead time*) e conseqüentemente o custo do produto. Para que isso seja atingido, é imprescindível o entendimento dos princípios físicos empregados nos métodos de inspeção e melhorar o conhecimento a respeito dos parâmetros utilizados.

Tratando-se de barras laminadas de aço, os métodos mais utilizados para inspeção de defeitos fazem uso das propriedades ferromagnéticas do material. No presente trabalho estudar-se-á os parâmetros de supressão de detecção de defeitos superficiais pelo método de inspeção por Fuga de Campo Magnético.

O objetivo do trabalho é entender qual o efeito dos parâmetros de supressão de defeitos no resultado da inspeção, e identificar um conjunto paramétrico que reduza a detecção de defeitos falsos, de modo a detectar apenas defeitos com profundidade acima do valor admissível. Isso deve ser obtido com a premissa de uma inspeção segura, onde a chance de erros de não detecção de defeitos verdadeiros não sofra aumento apreciável.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Defeitos Superficiais

Segundo Meyette, 1948, defeitos superficiais são falhas ou descontinuidades na superfície do material que tem origem quando uma ou mais etapas do processo de fabricação saem da normalidade. Tratando de barras de aço laminadas a quente, defeitos superficiais podem ter sua origem no processo de aciaria ou nos processos posteriores de conformação mecânica (Meyette, 1948).

De acordo com Ervasti e Stahlberg, 1999, é possível diferenciar defeitos com origem na aciaria devido à zona de partículas oxidadas que precipitam na matriz metálica e região descarbonetada junto ao defeito, que se formam devido às altas temperaturas e gradientes de resfriamento durante a solidificação do aço. Defeitos com essa origem podem ser formados nos processos de fusão, vazamento e resfriamento do aço. Invariavelmente esses defeitos serão modificados e possivelmente ocultados pelo processo posterior de laminação, onde o tarugo lingotado sofre substancial alongamento durante o processo no qual se torna uma barra laminada. Exemplos de defeitos superficiais com origem no processo de aciaria são escamas e trincas de aciaria (Ervasti e Stahlberg, 1999).

No processo de laminação os defeitos podem ter origem devido à aplicação de forças durante reduções abruptas da seção da barra laminada, ao mal ajuste dos rolos de laminação e a batidas e pequenos impactos nas pistas de laminação pelas quais a barra laminada é movimentada. Podem originar-se nesse processo defeitos como trincas, dobras e escamas de laminação (Ervasti e Stahlberg, 1999).

No presente trabalho, serão estudados os três principais tipos de defeitos superficiais: trincas, escamas e dobras.

2.1.1. Defeito tipo Trinca

Trincas são falhas na superfície do material, com ângulo de entrada próximo a 90 graus e comprimento variável. Pode ter sua origem na Aciaria, sendo o defeito modificado posteriormente na laminação, ou sendo produzido diretamente no processo de laminação (AISI Technical Committee on Rod and Bar Mills, 2005). A Figura 2.1 mostra a micrografia de uma trinca superficial obtida durante a realização do presente trabalho.

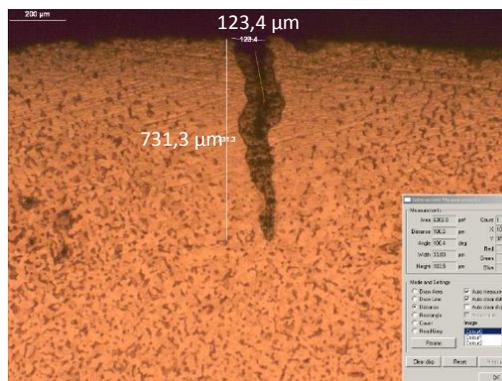


Figura 2.1: Trinca superficial, apresentando profundidade de 731,3 micrometros e abertura de 123,4 micrometros. Fonte: Autor.

2.1.2. Defeito tipo Escama

Escamas são defeitos superficiais com aspecto de pequenas laminas na superfície da barra laminada. Devido a essa geometria, esse defeito é o que apresenta maior área superficial, apesar de ser normalmente de pequena profundidade e pouca severidade (AISI Technical Committee on Rod and Bar Mills, 2005). A micrografia de um defeito tipo escama e a sua aparência na superfície da barra são mostradas na Figura 2.2, imagens obtidas durante a realização do presente trabalho.

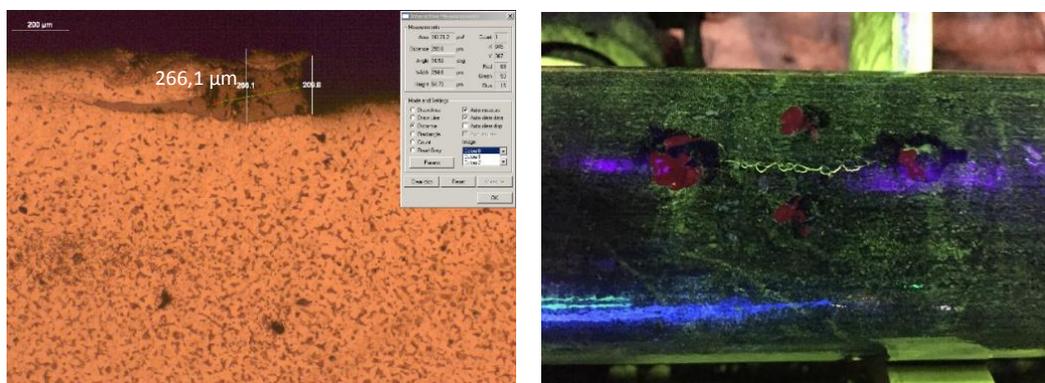


Figura 2.2: Micrografia de um defeito tipo escama, apresentando profundidade de 266,1 micrometros, e sua aparência na superfície da barra. Fonte: Autor.

Esse defeito pode ter sua origem no processo de aciaria, a partir de dobras ou marcas superficiais profundas no tarugo, sendo posteriormente transformado em escama durante o processo de laminação. Nesse caso, o defeito apresentará penetração de óxidos e descarbonetação (AISI Technical Committee on Rod and Bar Mills, 2005).

Porém, mais comum é a geração desse defeito no processo de laminação. Nesse processo, a chamada escama de laminação pode ter origem devido ao desgaste excessivo dos cilindros de laminação ou devido ao raspamento da barra sobre os rolos, impactos e batidas com ferramental (AISI Technical Committee on Rod and Bar Mills, 2005).

2.1.3. Defeito tipo Dobra

Esse tipo de defeito é caracterizado pela penetração oblíqua na superfície do material. Dobras são causadas pela superposição e deformação de material na superfície, tal como pela deformação plástica de defeitos superficiais, comumente trincas superficiais. Tem sua origem no processo de laminação devido à má calibração dos canais de laminação e montagem inadequada das guias de entrada e saída do material (AISI Technical Committee on Rod and Bar Mills, 2005).

2.2. Ensaios Não Destrutivos

Acidentes originados por defeitos em estruturas de aço podem ter importantes implicações, desde a substituição de produtos, prejuízos ao meio ambiente, até dano à vida humana. Devido a isso, é importante a utilização de ensaios não destrutivo de modo a submeter esses produtos a inspeção com vistas a busca de defeitos e imperfeições, garantindo a segurança operacional de estruturas e seus componentes, sem que para isso seja prejudicada sua posterior utilização.

De acordo com Mix, 2005, devido à versatilidade e conservação das propriedades e características dos produtos a eles submetidos, ensaios não destrutivos se popularizaram em campos como medicina, aviação e energia. Na indústria siderúrgica e metalúrgica, técnicas que utilizam a seu favor as propriedades ferromagnéticas dos materiais são os mais importantes métodos para realização deste tipo de teste. Os métodos mais utilizados para detecção de defeitos superficiais são Corrente Parasita (*Eddy Current*), Fuga de Campo Magnético e Partícula Magnética (Mix, 2005).

2.2.1. Fuga de Campo Magnético

De acordo com Wang et al, 2012, o método de Fuga de Campo Magnético originou-se a partir da técnica de inspeção por Partícula Magnética, e teve sua primeira aplicação na detecção de falhas em cordões de solda. Desde 1960, com a evolução das técnicas de magnetização, vêm sendo extensivamente utilizado na indústria petroquímica, nos setores energéticos e na indústria siderúrgica em geral (Wang et al, 2012).

Segundo Mix, 2005, de modo a avaliar a sanidade do material, o método de detecção de defeitos superficiais por Fuga de Campo Magnético utiliza campos eletromagnéticos gerados por corrente contínua ou alternada para saturar magneticamente a superfície do material. Quando o material é magnetizado, linhas de campo magnético surgem em seu interior, e devido à diferença de permeabilidade magnética entre o ar e o material, esse campo permanece no interior da peça e não é detectado externamente. Porém, havendo falha na superfície, a permeabilidade magnética na direção por onde fluem as linhas de campo sofre mudança, representando um obstáculo para o fluxo magnético, desse modo parte das linhas de campo magnético contornarão o defeito, e parte emergirá da superfície, gerando uma fuga de campo magnético proporcional à profundidade do defeito. Logo, com o uso de um sensor capaz de transformar campo magnético em sinal elétrico, é possível indicar a existência, posição e severidade de descontinuidades em um material ferromagnético (Mix, 2005). Esse conceito é ilustrado na Figura 2.3, adaptada de Wang et al (2012).

Embora o mecanismo pelo qual esse método funciona seja simples de ser entendido, seu funcionamento requer complexas interações entre campo elétrico gerador do fluxo magnético no material, campo magnético de fuga e características geométricas da falha na superfície do material.

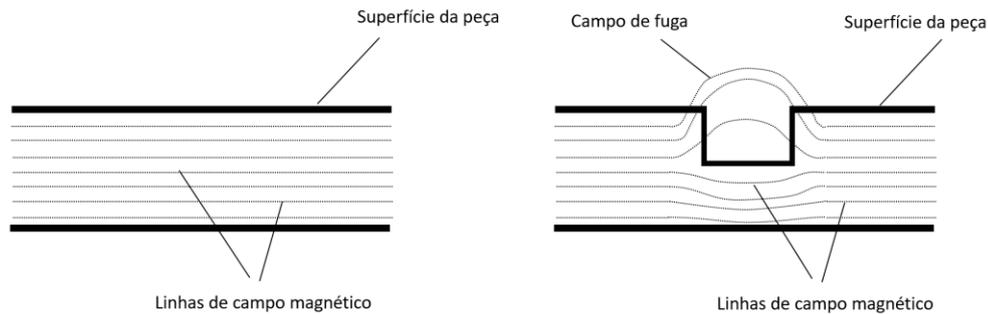


Figura 2.3: Ilustração do conceito do método de inspeção por Fuga de Campo Magnético. Adaptado de Wang et al, 2012.

Segundo Wang et al, 2012, o ponto mais crítico frente à implementação dessa técnica é a inversão do sinal magnético de modo a caracterizar os defeitos da peça em investigação, com o objetivo de detectar apenas determinados tipos de falhas superficiais de acordo com suas características. Essa dificuldade se dá principalmente devido às geometrias complicadas apresentadas por defeitos reais, caracterizadas por diversos parâmetros que podem variar em um mesmo defeito, como largura, abertura, ângulo de entrada e condições de fronteira.

2.2.1.1. Aplicação em Barras Laminadas de Aço

De acordo com Mix, 2005, a variação mais utilizada desse método para inspeção de barras laminadas de aço utiliza corrente alternada para gerar campo magnético de alta frequência, entre 1 a 30 kHz. Nessa configuração, a penetração do fluxo magnético é mínima na superfície, penetrando apenas na camada mais externa do material e saturando magneticamente essa área. Deste modo, a permeabilidade magnética da superfície chega a valores próximos a do ar, e isso faz com que uma falha no material provoque uma razão sinal/ruído que é facilmente detectada por um sensor solenoide, suprimindo a influência da rugosidade da superfície e vibrações da peça (Mix, 2005). A Figura 2.4, retirada de Foerster, 1999, ilustra a configuração de um aparelho de detecção de defeitos superficiais em barras laminadas, que possui essencialmente dois eletroímãs capazes de magnetizar a barra de aço, e no centro de cada um desses eletroímãs encontra-se uma sapata de teste contendo sensores solenoide (Foerster, 1999).

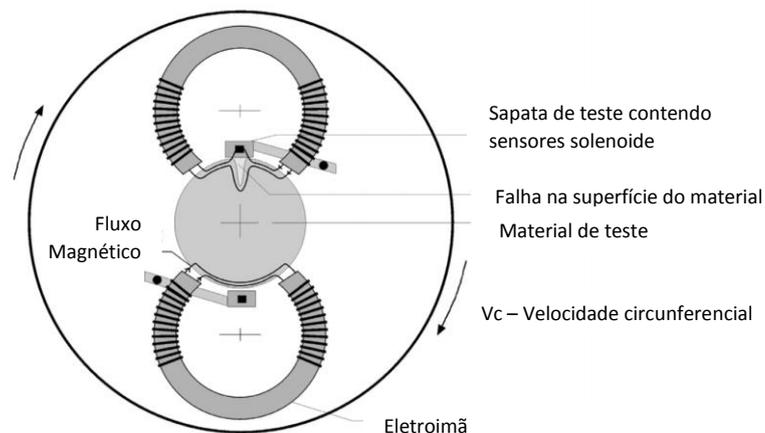


Figura 2.4. Configuração básica de um equipamento de inspeção por Fuga de Campo Magnético para inspeção de barras laminadas. Fonte: Foerster, 1999.

Os eletroímãs e sensores se movem circularmente ao redor da seção da barra com velocidade circunferencial V_c , enquanto a barra se move longitudinalmente com velocidade de avanço V_p , como mostrado na Figura 2.5, retirada de Foerster, 1999. Deste modo, o movimento relativo entre eles faz com que a trilha de detecção forme um helicóide na superfície da barra, devendo cobrir toda sua superfície sem haver omissões (Foerster, 1999).

Cada sensor contido na sapata de testes encontra-se a uma distância a afastado do próximo sensor, de modo que esse seja o comprimento mínimo de um defeito no qual se pode garantir sua detecção. Defeitos com comprimentos menores que a distância entre dois sensores adjacentes podem apresentar menores amplitudes de sinal caso se posicionem no espaço entre dois sensores durante o movimento de inspeção e não imediatamente abaixo deles.

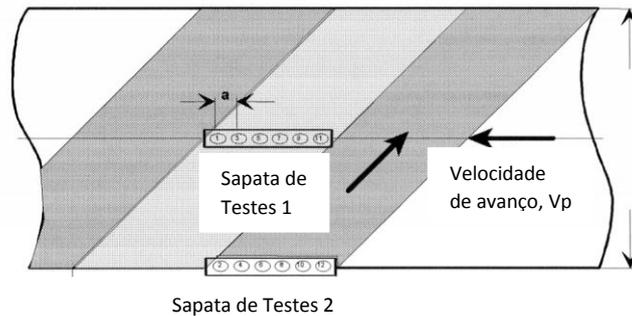


Figura 2.5: Ilustração das velocidades relativas das sapatas de teste e de avanço do material inspecionado, formando a trilha de inspeção no formato helicoidal. Fonte: Foerster, 1999.

2.2.1.2. Geometria dos Defeitos

A intensidade do fluxo magnético que escapa da superfície da barra tem grande dependência da geometria do defeito, e segundo Foerster (1998) deve ser aproximadamente proporcional à profundidade do defeito quando este trata-se de uma trinca padrão, com abertura constante e penetrando perpendicularmente à superfície da peça. Entretanto, tratando-se de defeitos reais, diversas características geométricas interagem entre si de modo a formar o campo magnético de fuga (Wang et al, 2012). As principais são o comprimento do defeito, alinhamento do defeito em relação ao eixo longitudinal da barra, profundidade, ângulo de entrada, abertura do defeito na superfície da barra e sua área superficial.

Defeitos alinhados em relação ao eixo longitudinal da barra são mais facilmente detectados, uma vez que o campo magnético que flui no material é circular, e deste modo suas linhas vão estar perpendiculares em relação à direção do defeito (Foerster, 1999). Essa característica é uma vantagem para o uso desse método em produtos laminados, uma vez que esse processo de conformação alinha e alonga os defeitos na direção do eixo longitudinal da barra.

Conforme Foerster, 1999, quanto ao ângulo de entrada dos defeitos na peça, defeitos orientados perpendicularmente à superfície são mais facilmente detectados que defeitos inclinados a ângulos diferente do ângulo reto com respeito à superfície do material. Quando mais inclinado for o defeito, menos intenso é seu campo magnético de fuga.

Segundo Becker, 2007, defeitos que crescem gradualmente na superfície da barra também são de difícil detecção, pois apresentam campos de fuga mais suaves que defeitos que penetram de maneira mais aguda. Isso ocorre uma vez que as linhas de campo magnético têm mais facilidade de contornar esses defeitos, emergindo em menor intensidade da sua superfície.

Também conforme esse autor, a abertura do defeito na superfície do material é requisito fundamental para formação do campo de fuga magnético, devendo essa dimensão ser maior que 0,05 mm de modo que o método seja eficaz na sua detecção.

A área superficial do defeito também é de grande influência: defeitos com grande área superficial, como escamas e dobras, podem apresentar sinal mais elevado que defeitos com pouca área superficial, como trincas, para a mesma profundidade. Isso ocorre devido à maior área de fuga de campo magnético nesses defeitos, de modo que o campo magnético de fuga

não é proporcional com a sua profundidade (Becker, 2007). Conforme Hexsel, 2012, esse é um ponto sensível do método de Fuga de Campo Magnético, uma vez que defeitos com grande área superficial são os maiores geradores de detecções falsas devido a sua pequena profundidade e sinal desproporcional.

2.3.2. Partícula Magnética

Segundo Mix, 2005, o método de detecção de defeitos por Partícula Magnética combina o mesmo princípio do método de Fuga de Campo Magnético com a detecção visual de defeitos. Como descrito na Seção 2.3.1, realizando a magnetização de um material ferromagnético, as linhas de campo permanecerão no seu interior, porém caso haja imperfeições na superfície do material o campo magnético pode escapar dessa superfície (Mix, 2005).

Utilizando esse princípio e cobrindo o material magnetizado com partículas ferromagnéticas, essas partículas serão atraídas pelas linhas de campo magnético que fluem das imperfeições na superfície do material, se acumulando nesses locais. As partículas então formam uma ponte, que devido a sua característica ferromagnética, permitem que o campo magnético flua pela imperfeição (Mix, 2005).

Uma variação desse método utilizada para barras laminadas de aço faz uso de contatos elétricos nas duas extremidades da barra, de modo que uma corrente elétrica percorre a barra longitudinalmente, criando assim um campo magnético circular no seu interior. A barra é magnetizada e sua superfície é coberta por partículas ferromagnéticas fluorescentes em suspensão, que são atraídas para falhas onde o campo magnético flui da superfície. Para visualização dos locais onde essas partículas se acumulam, luz ultravioleta é utilizada. A Figura 2.6, obtida durante a realização do presente trabalho, mostra a imagem de uma barra ao ser inspecionada por esse método, revelando uma trinca na sua superfície.



Figura 2.6: Barra inspecionada por partícula magnética com defeito do tipo Trinca, sendo possível visualizar claramente o defeito com auxílio do método. Fonte: Autor.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Definição do aço e seleção da amostra

No estudo foram utilizadas barras de seção circular laminadas a quente, de bitola 82,55 mm do aço SEW 44MnSiVS6. A composição química desse aço é mostrada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Composição química do aço SEW 44MnSiVS6

% Comp.	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%V	%Cu	%Al	%Ti
Máx.	0,47	1,5	0,7	0,03	0,09	0,28	0,2	0,05	0,23	0,25	0,015	0,025
Min.	0,43	1,35	0,6	0,0	0,04	0,22	0,0	0,0	0,2	0,0	0,006	0,0

Esse produto foi selecionado através de uma avaliação de criticidade que leva em conta dois fatores: a quantidade de defeitos superficiais por barra inspecionada e a quantidade de

barras produzidas do produto. Ambos são de grande importância em um ambiente fabril: não apenas a sanidade do material, dada pelo parâmetro defeitos por barra inspecionada, mas também a quantidade desse produto que é produzida, pois esse último diz a importância do estudo para diminuição de retrabalho e sucateamento de material na linha de produção.

Dentro dessa bitola e qualidade, foi selecionada uma amostra de 7 barras defeituosas, contendo 21 defeitos no total. As barras foram numeradas e seus defeitos foram identificados.

O critério para seleção de quais barras defeituosas participariam do estudo foi que mais de 50% dos defeitos presentes nessas barras fossem defeitos causadores de detecções falsas, ou seja, defeitos com profundidade menor que a admissível. Como descrito na seção 2.2.1.2, detecções falsas ocorrem principalmente para defeitos do tipo escama e dobra, que apresentam maior área superficial e devido a isso tem uma maior fuga de campo magnético que defeitos com menor área superficial, porém mais profundos, como trincas.

Comparando os defeitos causadores de detecções falsas, escamas com origem no processo de laminação são detectadas em maior frequência que escamas com origem na aciaria ou dobras: em números do ano de 2017, obtidos em uma empresa siderúrgica produtora de aços especiais, para cada 100 escamas de Laminação detectadas, 2,3 escamas de Aciaria e 3,4 dobras foram detectadas. A Figura 3.1 mostra a proporção entre as detecções dos três tipos de defeitos. Logo, devido ao elevado número de detecção, os defeitos a serem avaliados neste trabalho serão majoritariamente escamas de laminação.



Figura 3.1: Comparação dos números absolutos de 2017 de detecção dos defeitos escama com origem na laminação, escama com origem na aciaria e dobras.

3.2. Inspeção por Fuga de Campo Magnético

A amostra de barras de aço selecionada foi avaliada pelo equipamento de teste não destrutivo Circoflux DS 6.145, com objetivo de verificar a existência ou não de defeitos superficiais nas barras de aço laminado por meio do método de Fuga de Campo Magnético. O equipamento é configurado para magnetizar a barra com campo elétrico alternada de 6 kHz, e segundo o seu manual de operação (Foerster, 2011) sua resolução é de 0,100 mm na direção de profundidade do defeito. As duas sapatas de teste contam com 4 sensores solenoide cada, que ficam a 12,5 mm de distância do sensor adjacente.

A avaliação do material pelo equipamento segue o fluxograma da Figura 3.2. Após a superfície da barra ser magnetizada até atingir a saturação eletromagnética, sensores solenoides do equipamento captam o campo eletromagnético de fuga da superfície e o transformam em um sinal elétrico que é transmitido pelo canal de teste. Esse sinal depende do tipo de material, estado superficial da barra, diâmetro da barra e velocidade do teste. O sinal é avaliado quanto a sua amplitude, e o valor da amplitude é comparado com níveis de inspeção com objetivo de classificar os sinais como defeitos ou não. A barra então é classificada quanto

à existência de defeitos, e sendo defeituosa é segregada das demais, indo automaticamente para uma estação de remoção de defeitos.

Na etapa de Análise do Sinal, as amplitudes dos sinais detectados na superfície da barra são comparadas com níveis de inspeção, que sinalizam a profundidade dos defeitos, em milímetros, e servem para sua classificação como defeitos ou não. Podem ser utilizados até 3 níveis de inspeção: F1, F2 e F3, com a condição de que $F1 \leq F2 \leq F3$. O nível de inspeção F1 sinaliza a profundidade até onde defeitos são admissíveis. Sinais com amplitude maior que F1 são classificados como defeitos na barra, sendo a severidade máxima quando ultrapassam o nível F3.

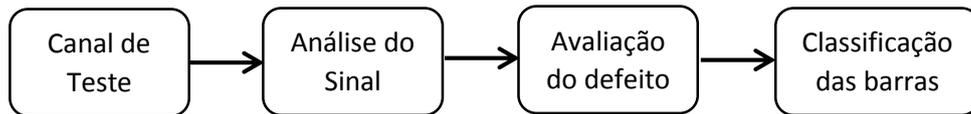


Figura 3.2: Fluxograma de avaliação de barras laminadas pelo equipamento Circoflux DS 6.145.

Cada barra é descrita pelo equipamento como um oscilograma, que mostra a amplitude do maior sinal recebido em cada ponto do comprimento da barra. O oscilograma é dividido em três faixas de cores de acordo com os níveis de inspeção utilizados, sendo o nível de inspeção F3 o limite superior do oscilograma. Todas as barras avaliadas nesse trabalho tiveram seu oscilograma registrado. A Figura 3.3 mostra o oscilograma de uma das barras que fez parte da amostra estudada.

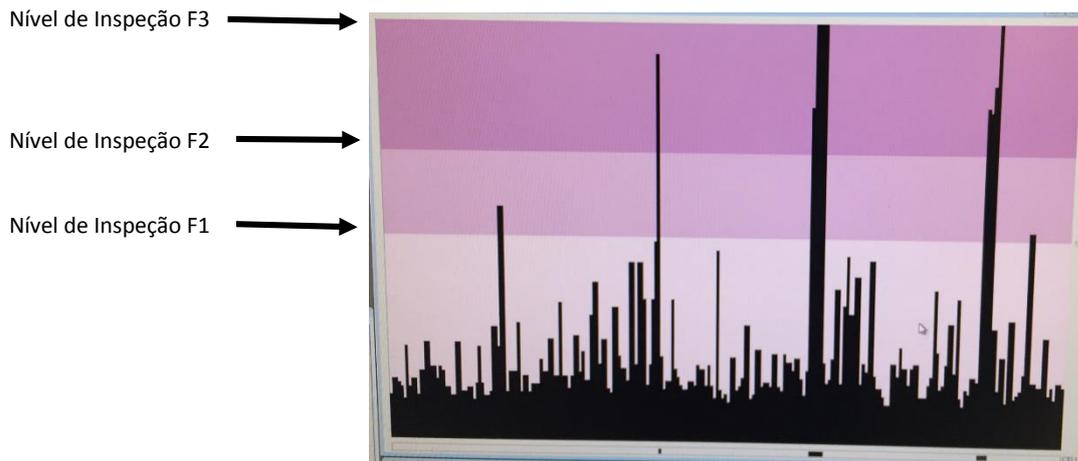


Figura 3.3: Oscilograma de uma barra da amostra estudada. Sinais mais altos sinalizam a presença de defeitos mais severos.

Após realizada a análise do sinal, podem ser aplicadas 3 opções de avaliação de defeitos: Supressão de Defeitos Curtos, Acumulação de Eventos e Mínima Distância Entre Defeitos. No presente trabalho será abordado apenas a Supressão de Defeitos Curtos (SDC).

3.2.1. Supressão de Defeitos Curtos

Essa ferramenta tem o objetivo de garantir que falhas no material com comprimentos menores que um determinado valor não sejam consideradas defeitos. Deste modo, a Supressão de Defeitos Curtos é aplicada para reduzir a detecção de defeitos falsos na direção longitudinal da barra, que de outro modo seriam detectados pelo equipamento.

Essa configuração pode ser aplicada para defeitos em qualquer nível de inspeção, e o comprimento que pode ser suprimido é uma variável discreta de múltiplos inteiros da distância entre os sensores solenoides do equipamento, que tem a função de detectar o campo magnético de fuga na superfície da barra. Esses sensores são posicionados com 12,5 mm de distância

entre si: logo, é possível suprimir defeitos menores que 12,5 mm, 25 mm, 37,5 mm, até o valor de 87,5 mm, uma vez que as sapatas de teste possuem 8 sensores no total.

Usa-se a seguinte notação:

- SDC_1: Supressão de Defeitos Curtos no primeiro nível de inspeção, F1.
- SDC_2: Supressão de Defeitos Curtos no segundo nível de inspeção, F2.
- SDC_3: Supressão de Defeitos Curtos no terceiro nível de inspeção, F3.

Pode-se também suprimir diferentes comprimentos de defeitos para diferentes níveis de inspeção, com a condição que em níveis de inspeção maiores sejam suprimidos defeitos menores ou iguais que os níveis de inspeção mais baixos, ou seja: $SDC_1 \geq SDC_2 \geq SDC_3$. Um exemplo disso é que no caso de estarem sendo suprimidos defeitos menores que 25 mm no Nível de Inspeção F1, nos Níveis de Inspeção F2 e F3 pode-se suprimir defeitos menores que 25 mm ou 12,5 mm ou não suprimir defeitos. Porém, para esses níveis não se consegue suprimir defeitos maiores que 25 mm, pois essa supressão seria maior que a utilizada no nível de inspeção mais baixo, F1.

A Figura 3.4 ilustra a função dos níveis de inspeção e dos parâmetros de Supressão de Defeitos Curtos. Sendo a superfície da barra o eixo das abcissas do oscilograma da figura, sinais com amplitude entre a superfície da barra e o nível de inspeção F1 não são consideradas defeitos. Falhas entre o nível de inspeção F1 e F2 são consideradas defeitos apenas se o seu comprimento for maior que o valor do parâmetro SDC_1, falhas com profundidade entre o nível de inspeção F2 e F3 são consideradas defeitos apenas se o seu comprimento for maior que SDC_2, e falhas com profundidade acima do nível de inspeção F3 serão consideradas defeitos apenas se seu comprimento for superior que SDC_3. Deste modo, a área hachurada da Figura 3.4 representa a área onde defeitos não devem ser detectados.

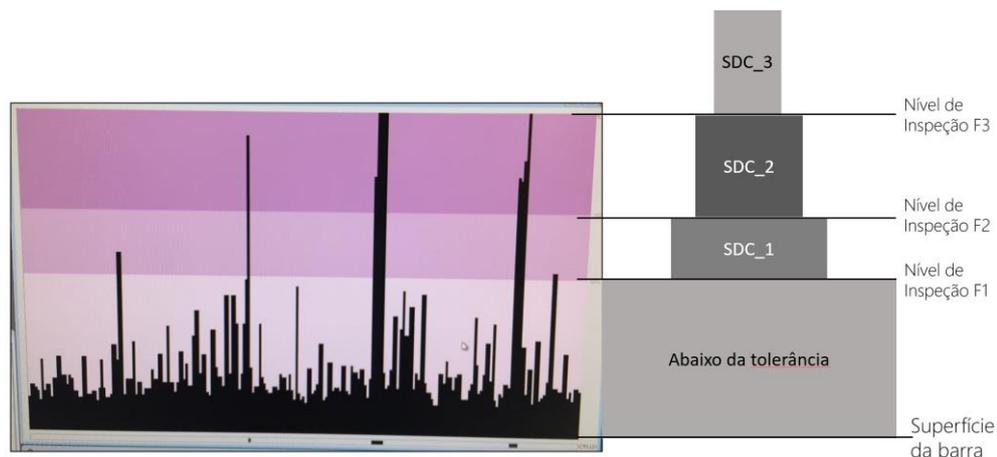


Figura 3.4: Ilustração do funcionamento dos níveis de inspeção e dos parâmetros de Supressão de Defeitos Curtos.

3.3. Projeto de Experimento – Fatorial 3^2

Para realizar o estudo foi aplicado o projeto experimental fatorial 3^2 , onde 2 fatores são variados em três níveis cada um (Montgomery, 2002).

Essa configuração requer que cada réplica do experimento conte com um total de 9 combinações diferentes de seus parâmetros, realizadas em ordem aleatória. Neste trabalho foram realizadas duas réplicas, ou seja, as combinações foram repetidas duas vezes totalizando 18 corridas diferentes.

O efeito principal de cada fator é definido como uma mudança na resposta produzida por uma variação no nível do fator. Deve-se investigar também a interação entre os fatores estudados: quando a resposta frente a mudança de nível de um fator não é a mesma quando em diferentes níveis do segundo fator.

Os fatores avaliados foram o segundo nível de inspeção, F2, e os parâmetros de supressão de defeitos SDC_1, SDC_2 e SDC_3 variando juntos, de modo a trabalhar como um único conjunto de parâmetros: o valor de SDC_1 sempre 25 mm maior que SDC_2, e o valor SDC_2 sempre igual ao valor de SDC_3. Os valores dos níveis de inspeção F1 e F3 serão mantidos fixos. Esses parâmetros e os valores associados são mostrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Parâmetros de inspeção e seus valores associados.

Parâmetro	Valor associado		
F1	0,5 mm (fixo)		
F2	0,7 mm	0,8 mm	0,9 mm
F3	1,0 mm (fixo)		
SDC_1	37,5 mm	50 mm	75 mm
SDC_2	12,5 mm	25 mm	50 mm
SDC_3	12,5 mm	25 mm	50 mm

A inspeção de uma falha ou imperfeição na superfície do material para qualquer conjunto de parâmetros pode ter duas respostas: detecção e não detecção. Qualquer que seja essa resposta, ela pode estar ou não correta. Esse raciocínio pode ser ilustrado pela árvore de respostas da Figura 3.5.

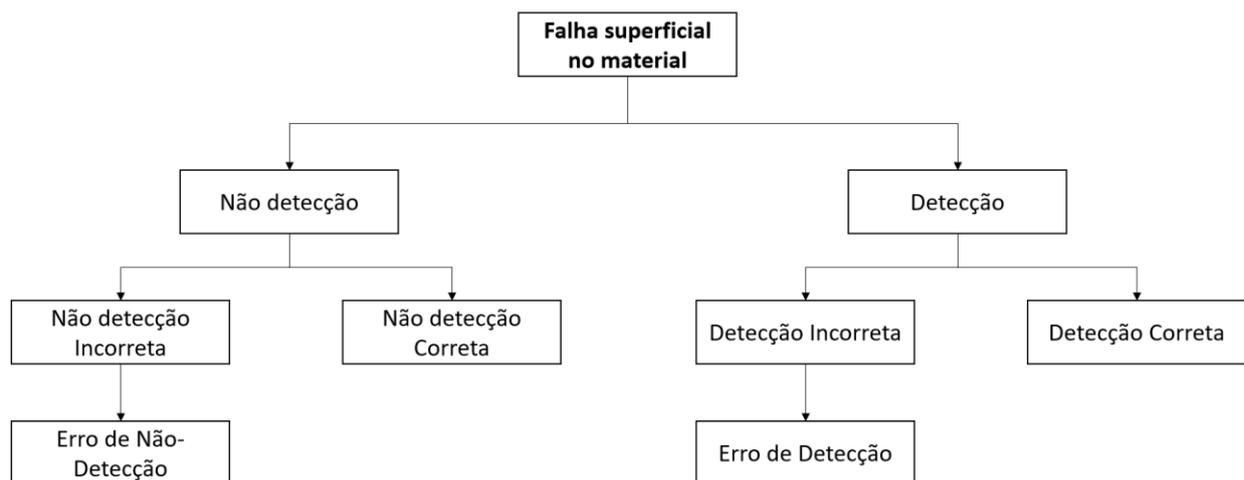


Figura 3.5: Árvore de respostas decorrente da inspeção de uma falha ou imperfeição na superfície de um material.

Para análise da significância estatística dos parâmetros de inspeção do experimento e das suas interações, duas respostas retiradas da Figura 3.6 foram avaliadas:

- Erros de Detecção;
- Erros de Não Detecção.

3.4. Inspeção por Partícula Magnética e Corte de Amostras

Após a seleção da amostra e realização das 18 corridas propostas pelo projeto experimental, as barras do estudo foram enviadas para uma estação de remoção de defeitos para que fossem avaliadas pelo método de partícula magnética. Nessa estação todos os defeitos presentes foram identificados, classificados por seu tipo e tiveram seus comprimentos medidos. Foi marcado com marcador esferográfico industrial a posição desses defeitos, como mostrado na Figura 3.6a, e então foram cortadas amostras contendo esses defeitos, os quais foram identificados e enviados para análise em laboratório metalúrgico, conforme Figura 3.6b.

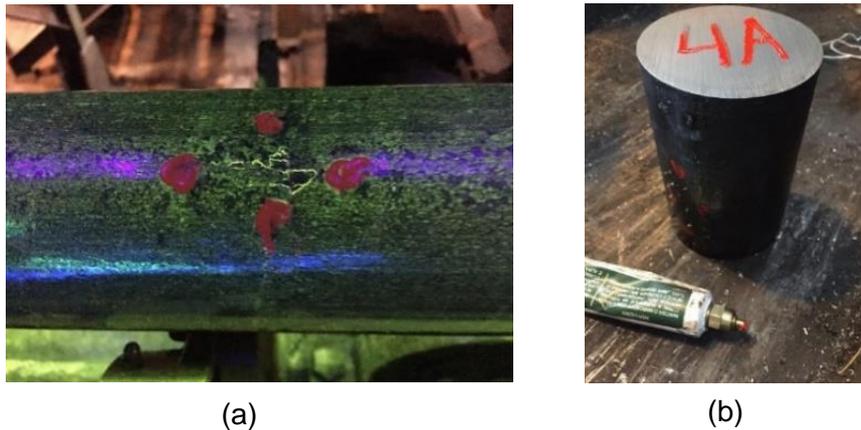


Figura 3.6 – (a) Defeito do tipo escama de laminação visualizado com auxílio do método de partícula magnética. Os pontos vermelhos são marcações da posição do defeito para análise no laboratório metalúrgico; (b) Amostra cortada na estação de remoção de defeitos e identificada antes de ser enviada para o laboratório.

3.5. Análise Metalográfica dos defeitos

Os defeitos presentes nas barras de aço estudadas foram submetidos a análise metalográfica em laboratório metalúrgico de modo a se obterem 3 parâmetros: profundidade do defeito, ângulo de entrada e abertura do defeito na superfície da peça.

Soma-se a esses um quarto parâmetro, comprimento do defeito, obtido na etapa anterior de Inspeção por Partícula Magnética e Corte de Amostras. A micrografia de um defeito do tipo escama de laminação analisada no experimento é mostrada na Figura 3.7.

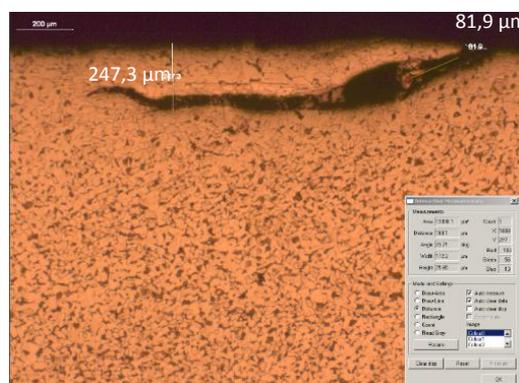


Figura 3.7: Micrografia de um defeito do tipo escama de laminação, após ataque com reagente nital 2% e aproximação de 50x.

Com o conhecimento desses 4 parâmetros e a resposta do experimento se o defeito foi ou não detectado, é possível discutir os motivos da resposta da detecção. Entretanto, para avaliar se o defeito foi ou não detectado corretamente ou incorretamente, será avaliado apenas o parâmetro profundidade do defeito, devido a clientes normalmente avaliarem defeitos como admissíveis baseados nesse parâmetro.

4. RESULTADOS

Com os resultados experimentais e as análises metalográficas dos defeitos foi possível mensurar os Erros de Detecção e Erros de Não Detecção para cada conjunto de parâmetros

testados nas 18 repetições realizadas no experimento, dados mostrados na Tabela 4.1. A partir dessas respostas fez-se o tratamento dos dados através da técnica estatística aplicada para o projeto experimental fatorial 3^2 .

Tabela 4.1 – Erros de Detecção e Erros de Não Detecção resultante nas 18 repetições do projeto de experimento.

Repetição	F2 (mm)	Supressão de Defeitos Curtos SDC_1+SDC_2+SDC_3 (mm)	Erros de Detecção	Erros de Não Detecção
1	0,70	37,5+12,5+12,5	2	1
2	0,90	37,5+12,5+12,5	1	3
3	0,80	50+25+25	1	2
4	0,90	50+25+25	1	3
5	0,70	75+50+50	0	4
6	0,90	75+50+50	0	4
7	0,80	50+25+25	0	2
8	0,90	75+50+50	0	5
9	0,70	75+50+50	0	4
10	0,70	50+25+25	0	2
11	0,90	50+25+25	0	2
12	0,80	37,5+12,5+12,5	1	1
13	0,80	75+50+50	1	3
14	0,70	37,5+12,5+12,5	4	1
15	0,80	75+50+50	0	5
16	0,70	50+25+25	1	2
17	0,80	37,5+12,5+12,5	3	2
18	0,90	37,5+12,5+12,5	2	1

Analisando estatisticamente os dados, determinou-se que o parâmetro Supressão de Defeitos Curtos tem significância estatística para as duas respostas do experimento, apresentando p-valor menor que 0,05 para ambos os casos, em um intervalo de confiança de 95%. O termo p-valor é a probabilidade de significância, e caso apresente valor menor que 0,05 pode-se rejeitar a hipótese nula, tomando como verdadeira a hipótese de que há diferença nas médias da resposta sob os efeitos do parâmetro estudado.

O parâmetro Nível de Inspeção F2, obteve, porém, p-valor maior que 0,05 para as duas respostas do experimento. Com isso, aceita-se a hipótese nula de que com um intervalo de confiança de 95% não há diferenças significativas nas médias do resultado quando variações nesse parâmetro são realizadas.

Dois dos 21 defeitos analisados totalizaram 48% dos erros de inspeção, contando ambos Erros de Detecção e Erros de Não Detecção. No Apêndice A apresenta-se uma discussão detalhada a respeito dos motivos que podem ter levado ao elevado número de respostas erradas do sistema de detecção nesses casos.

As respostas médias do experimento em função dos parâmetros Supressão de Defeitos Curtos e Nível de Inspeção F2, Figura 4.1, mostram a interação entre os dois fatores, e pode-se observar que o resultado está de acordo com as mudanças efetuadas: a resposta Erro de Detecção, ou seja, o erro por detectar defeitos falsos, foi reduzida com a adoção do parâmetro Supressão de Defeitos Curtos de maior valor – 75 mm + 50 mm + 50 mm, chegando a zero quando combinado com um Nível de Inspeção F2 de 0,90 mm, justamente a combinação menos conservativa de parâmetros. Inversamente, a combinação de parâmetros com o menor valor de Supressão de Defeitos Curtos – 37,5 mm+12,5 mm+12,5 mm – e menor valor de F2 – 0,70 mm – obteve o maior número de Erros de Detecção, detectando mais defeitos falsos. O valor intermediário de Supressão de Defeitos Curtos – 50+25+25 – rendeu também uma resposta de erros intermediária, idêntica para todos os valores do Nível de Inspeção F2.

Analogamente, o Erro de Não Detecção de defeitos verdadeiros teve comportamento oposto: A combinação de parâmetros menos conservativo, Supressão de Defeitos Curtos com o conjunto 75 mm+50 mm+50 mm e o Nível de Inspeção F2 de 0,9 mm resultou em 4,5 vezes a quantidade média de erros que o conjunto mais conservativo. Novamente, o conjunto

paramétrico com valor Supressão de Defeitos Curtos intermediário, 50mm+25 mm+25 mm, teve resultados condizente: menos erros por não detectar defeitos verdadeiros que o conjunto mais aberto de detecção, e mais erros que o conjunto mais conservador. Esse valor de Supressão de Defeitos Curtos, combinado com valores do Nível de Inspeção F2 de 0,7 resultou em 2 vezes mais erros que o conjunto 37 mm+12,5 mm+12,5mm e metade dos erros do conjunto menos exigente para o mesmo Nível de Inspeção F2. É interessante notar nesse gráfico que a curva da resposta do Erro de Não Detecção como função da Supressão de Defeitos Curtos foi paralela para os valores de F2 iguais a 0,8 e 0,9, sendo deslocada para cima 0,5 pontos no conjunto menos conservativo.

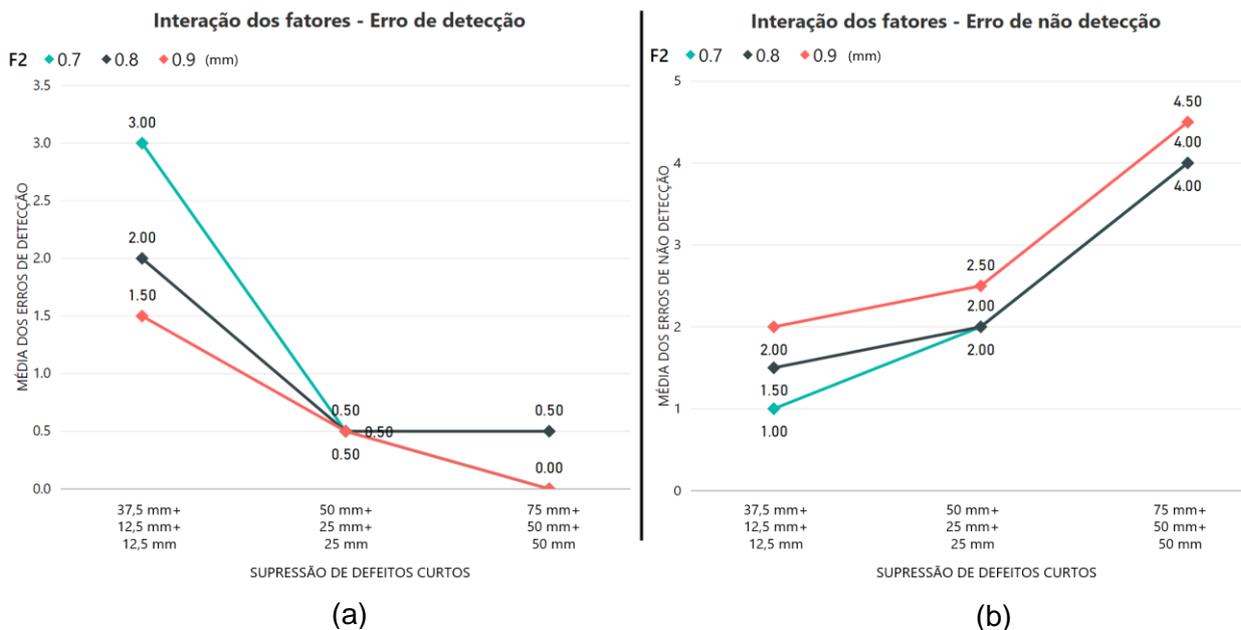


Figura 4.1 – Comportamento médio de resposta do experimento para os parâmetros testados: (a) Resposta do Erro de detecção. (b) Resposta do Erro de não detecção.

Observando o comportamento geral da resposta do sistema de inspeção em função dos parâmetros de controle utilizados, é importante a análise dos parâmetros separadamente e de seus efeitos principais de modo a simplificar a avaliação do resultado experimental. A Figura 4.2a mostra o gráfico da resposta média para Erros de Detecção e Não Detecção em função do parâmetro Supressão de Defeitos Curtos, enquanto na Figura 4.2b apresenta-se os valores de ambos os Erros em função do Nível de Inspeção F2.

O primeiro ponto de destaque é a diferença entre as inclinações das curvas da Figura 4.2a e 4.2b: em ambos os gráficos, da esquerda para a direita no eixo das abcissas a alteração no parâmetro deve fornecer uma inspeção menos exigente, ou seja, rejeitando menos defeitos falsos e possivelmente não detectando maior número de defeitos verdadeiros. Esse comportamento é visto em ambos os gráficos, com a redução do Erro de Detecção e o aumento do Erro de Não Detecção. Contudo as inclinações das curvas mostram que esse efeito ocorre com mais intensidade com a alteração da Supressão de Defeitos Curtos que com o aumento do Nível de Inspeção F2, justificando o resultado estatístico de que apenas o primeiro parâmetro é significativo (p-valor menor que 0,05).

No gráfico da Figura 4.2a, pode-se observar a grande divergência de resultados conforme o parâmetro Supressão de Defeitos Curtos é aumentado. Junto a isso, nota-se que para o conjunto de parâmetros mais conservativo o Erro de Não Detecção é menor que o Erro de Detecção, sinalizando um número de detecções de defeitos falsos 44,6% maior que o número de falhas na detecção de um defeito verdadeiro. Resultado de uma detecção de fato conservadora e segura. No nível intermediário do parâmetro, por outro lado, as curvas dos erros se cruzam e o Erro de Não Detecção já apresenta maior valor que o Erro de Detecção. Esse

comportamento continua no parâmetro 75 mm+50 mm+50 mm, que representa a inspeção mais aberta testada no experimento, onde o Erro de Não Detecção é 240% maior que o Erro de Detecção, em valores médios.

Comparando os conjuntos paramétricos em pares, temos que o Erro de Não Detecção experimenta um crescimento de 30,9% entre o conjunto mais conservador – 37,5 mm+12,5 mm+12,5 mm – e o conjunto intermediário – 50 mm+25 mm+25 mm. Para esse par, o Erro de Detecção cai 77,0%. Entre o conjunto intermediário e o conjunto mais aberto – 75 mm+50 mm+50 mm – a curva representando o Erro de Não Detecção em função do parâmetro ganha maior inclinação, acentuando o aumento desse erro em 92,2%. Ao mesmo tempo, uma redução no valor do Erro de Detecção de 66,0% é contabilizada. A comparação entre os parâmetros extremos conta com variações maiores: há uma redução do Erro de Detecção de 92,2%, porém o Erro de Não Detecção atinge um acréscimo 178,0%.

A comparação das respostas entre os níveis do parâmetro Nível de Inspeção F2 traz variações de menor amplitude: entre os extremos do parâmetro, a redução média do Erro de Detecção é de 43%, enquanto o Erro de Não Detecção experimenta um aumento de 29%, com este último sempre sendo maior que o primeiro.

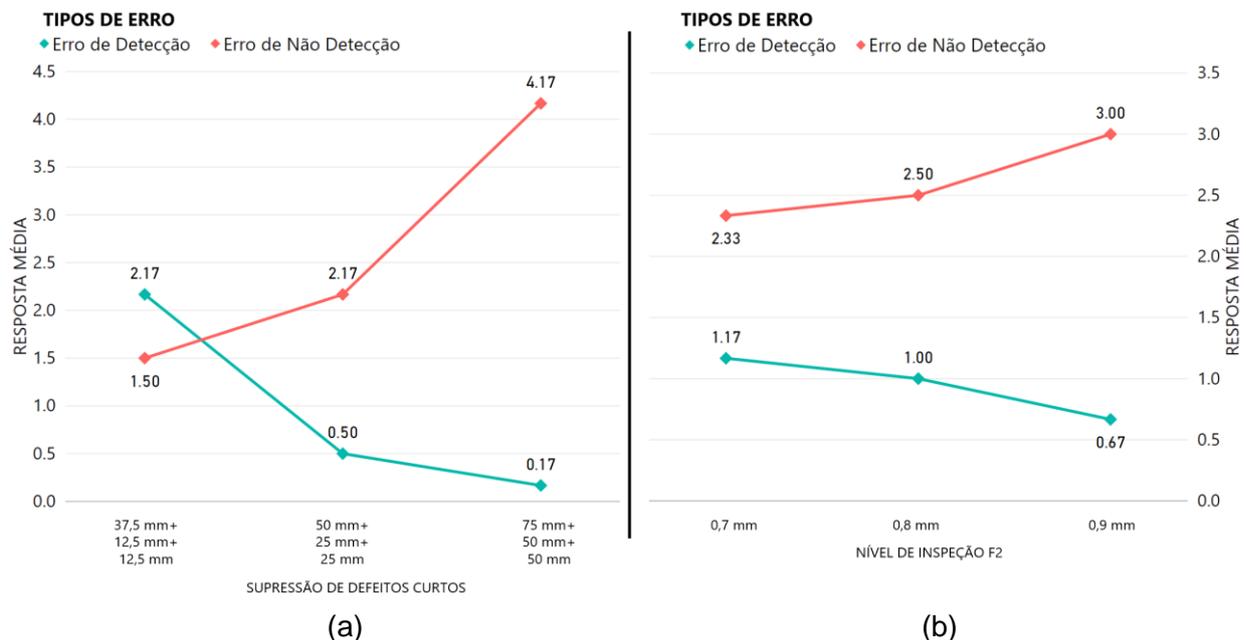


Figura 4.2: A Figura 4,2a refere-se a resposta do experimento frente ao parâmetro Supressão de Defeitos Curtos e a Figura 4.2b refere-se a resposta frente ao parâmetro Nível de Inspeção F2.

5. CONCLUSÕES

A produção de aços especiais comumente requer a inspeção de cem por cento de seus produtos, e para que o processo seja mais eficiente e confiável é importante a obtenção de uma etapa de inspeção que consiga um número mínimo de erros: que seja capaz de avaliar defeitos acima da tolerância do cliente como verdadeiros, de outro modo sendo falsos. No presente trabalho foram avaliados os parâmetros de entrada do processo de inspeção de defeitos superficiais em barras de aço laminado pelo método de fuga de campo magnético, de forma a responder se há um conjunto desses parâmetros que minimize os Erros de Detecção, ou seja, a detecção de defeitos falsos, porém sem deixar de detectar defeitos verdadeiros, ou aumentar os Erros de Não Detecção.

Com a realização do projeto experimental fatorial 3^2 avaliando dois conjuntos de parâmetros, Nível de Inspeção F2 e Supressão de Defeitos Curtos, conclui-se que apenas o último é significativo para a mudança das médias das respostas. Os resultados mostram que

com a variação desse parâmetro de modo a suprimir defeitos maiores consegue-se obter uma redução do Erro de Detecção. Porém como subproduto disso há também um aumento do Erro de Não Detecção, rendendo uma inspeção menos conservadora e com maior probabilidade de erro.

Em adição a isso, foi notado que partindo do parâmetro Supressão de Defeitos Curtos na sua posição mais conservadora para uma posição intermediária, conseguiu-se uma maior redução do Erro de Detecção do que um aumento no Erro de Não Detecção. Porém, avançado para um parâmetro mais aberto o Erro de Não Detecção aumentou acentuadamente, rendendo uma inspeção insegura.

Deste modo, avalia-se que existe campo para continuação do presente estudo e por fim aplicação do método de supressão de defeitos curtos quando trabalhando entre a faixa mais conservadora e intermediária do parâmetro Supressão de Defeitos Curtos. Porém, invariavelmente para os parâmetros estudados, uma redução nas detecções de defeitos falsos resultou em um ônus na qualidade da inspeção.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AISI Technical Committee on Rod and Bar Mills; **“Detection, Classification and Elimination of Rod and Bar Surface Defects”**, 2005.

Becker, R. H. S.; **“Estudo da Detecção de Defeitos Superficiais pelo Método de Fuga de Campo Magnético”**, Trabalho de Conclusão de curso de Engenharia de Materiais, 2007.

Ervasti, E., Stahlberg, U.; **“Transversal cracks and their behavior in the hot rolling of steel slabs”**, Journal of Materials Processing Technology, 1999.

Hexsel, F.; **“Influência dos Parâmetros de Inspeção de Barras Laminadas em Linhas de Inspeção Automatizadas sobre o Percentual de Rejeição por Defeitos Superficiais do Aço DIN-20MnCr5 Mob”**, Dissertação de Mestrado, 2012.

INSTITUT DR. FOERSTER; **“Instruction Manual”**, 1999.

INSTITUT DR. FOERSTER; **“Operating Instructions”**, 2011.

Meyette, C. L., Elliott, V. E.; **“A Method for Determining the Origin of Surface Defects in Rolled Steel Products”**, American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1948.

Mix, P. E.; **“Introduction to Nondestructive Testing – A Training Guide”**, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2005.

Montgomery, D. C.; **“Design and analysis of experiments”**, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002.

Passos, T. V., Maciel, C. S.; **“Siderurgia e o desafio chinês: análise da expansão da capacidade produtiva”**, Leituras de Economia Política, Campinas, 2017.

Wang, Z. D., Gu, Y., Wang, Y. S.; **“A Review of three magnetic NDT Technologies”**, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2012.

APÊNDICE A

Os defeitos 3-A e 3-C juntos, totalizaram 48% de todos os erros de inspeção registrados no projeto experimental. É trazida nos Apêndice A.1 e A.2 uma discussão dos motivos que levaram a inabilidade do sistema de inspeção a corretamente avaliar esses defeitos.

A.1. Defeito 3-A

Tabela A.1 – Características do defeito 3-A

Comprimento	Profundidade	Abertura	Ângulo de Entrada
90 mm	0,508 mm	0,161 mm	90 graus

O defeito 3-A trata-se de uma trinca com penetração em ângulo reto na superfície do material. Esse defeito, devido a sua profundidade de 0,508 mm ser maior que a profundidade admissível de 0,500 mm, deveria ser detectado pelo sistema de inspeção, porém a detecção falhou em 13 das 18 repetições realizadas.

A não detecção desse defeito não pode ser justificada pela sua abertura na superfície, uma vez que o método deve ter boa performance para defeitos com abertura maior que 0,050 mm. Também não se justifica pelo seu comprimento de 90 mm, maior que todos os valores de supressão de defeitos curtos utilizados. E tampouco é justificada pelo seu ângulo de penetração de 90 graus, ideal para o método de detecção.

A justificativa para a não detecção do defeito se dá pela sua profundidade, muito próxima da admissível. Essa diferença de 0,008 mm encontra-se abaixo da resolução do sistema de 0,100 mm.

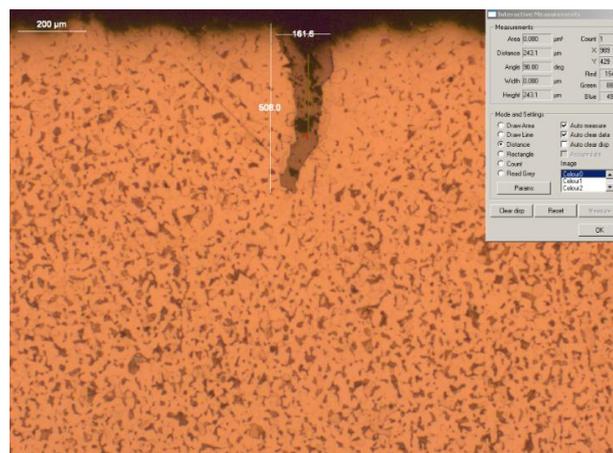


Figura A.1 – Análise metalográfica do defeito 3-A, trazendo as características de entrada do defeito na superfície da peça

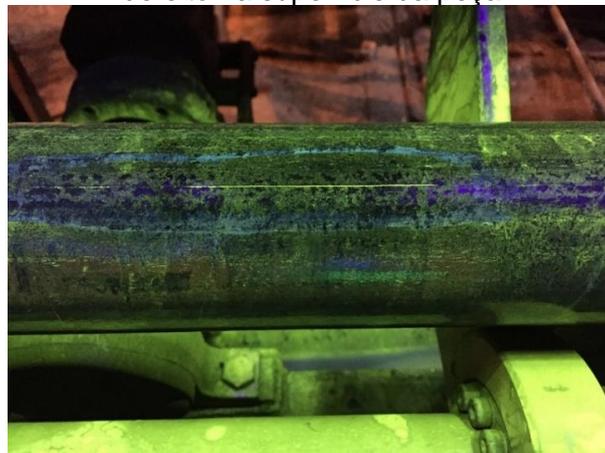


Figura A.2 – Defeito 3.A na superfície da peça, sendo analisado pelo método de Partícula Magnética

A.2. Defeito 3-C

Tabela A.2 – Características do defeito 3-C

Comprimento	Profundidade	Abertura	Ângulo de Entrada
20 mm	0,820 mm	4,000 mm	90 graus

O defeito 3-C trata-se de uma marca na superfície da barra, provavelmente causada por colisão com alguma superfície no trem de laminação. O defeito tem grande área superficial e abertura na superfície da peça, e devido a sua profundidade maior que 0,500 mm, deveria ter sido detectado. Entretanto, todas as 18 repetições realizadas erraram a detecção desse defeito.

O fator mais importante para a não detecção errônea desse defeito é sua abertura suave na superfície do material. Devido a isso, as linhas de campo magnético têm mais facilidade para contornar o defeito, sem emergir dele. Deste modo, o campo magnético de fuga gerado é mais fraco e passível de não detecção.

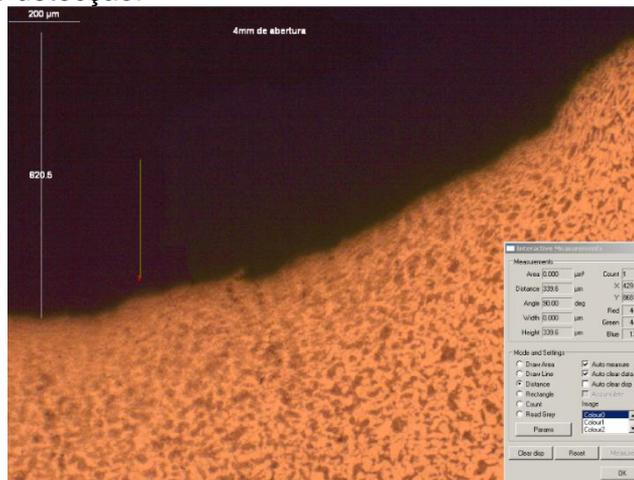


Figura A.3 – Análise metalográfica do defeito 3-C, trazendo as características de entrada do defeito na superfície da peça



Figura A.4 – Defeito 3.C na superfície da peça, sendo analisado pelo método de Partícula Magnética. Defeito está marcado com quatro pontos de modo a sinalizar local para corte de amostra para metalografia.