



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA CENTRAL
CURSO ENGENHARIA MECÂNICA**

DOUGLAS PIRES MENDES

**ANÁLISE DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS NA DETECÇÃO E
CARACTERIZAÇÃO DE DESCONTINUIDADES**

TERESINA

2022

DOUGLAS PIRES MENDES

ANÁLISE DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS NA DETECÇÃO E
CARACTERIZAÇÃO DE DESCONTINUIDADES

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Bacharelado em
Engenharia Mecânica do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Central.

Orientador: Prof. Dr. Ayrton de Sá Brandim.

TERESINA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Mendes, Douglas Pires

M538a Análise de ensaios não destrutivos na detecção e caracterização de
descontinuidades / Douglas Pires Mendes. - 2022.
35 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica)
- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Central, 2022.

Orientador : Prof. Dr. Ayrton de Sá Brandim.

1. Testes não destrutivos. 2. Ensaio de ultrassom. 3. Análise de trincas.
4. Ensaio de líquido penetrante. I.Título.

CDD - 620

Elaborado por Maria Rosismar Farias CRB 3/631

DOUGLAS PIRES MENDES

ANÁLISE DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS NA DETECÇÃO E
CARACTERIZAÇÃO DE DESCONTINUIDADES

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Bacharelado em
Engenharia Mecânica do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Central.

Orientador: Prof. Dr. Ayrton de Sá Brandim.

Aprovado em: 08/11/2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ayrton de Sá Brandim (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Me. Gustavo Portela de Deus
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Me. José Matias Ferreira Filho
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu Deus, pois amo e adoro a Deus sobre todas as coisas, nele confio minha existência e sua benção é o motivo da realização de todos os meus sonhos. Agradeço aos meus pais, porque honrando os seus ensinamentos eu pude evoluir para ser uma pessoa melhor a cada dia.

Agradeço todos os professores e servidores do IFPI do Campus Teresina Central, pois passaram pela minha trajetória e contribuíram com a minha vitória.

Agradeço ao Sr. Agostinho e todos os colaboradores da Oficina Faro Certo, que deram todo o apoio necessário para que o trabalho fosse executado.

E aos meus colegas e familiares, que contribuíram direta e indiretamente para que eu chegasse até aqui.

RESUMO

De acordo com Hellier (2013), um Ensaio Não Destrutivo (END) é qualquer avaliação feita em qualquer tipo de objeto de teste sem alterar esse objeto de alguma forma, a fim de determinar a ausência ou presença de condições ou descontinuidades. Portanto, é uma maneira eficaz de obter informações sobre defeitos, características estruturais do material e acompanhar como está acontecendo a degradação durante a vida útil de componentes mecânicos. Embora o END não possa garantir que falhas não ocorrerão, ele desempenha um papel significativo nisso minimizando as possibilidades de falha. Por consequência, tornou-se parte integrante de todos os processos da indústria, desde exames em matérias-primas até avaliação de produtos acabados e colocados em funcionamento. O objetivo do trabalho é analisar comparativamente a adequação de diferentes testes não destrutivos na detecção e caracterização de descontinuidades. Para esse propósito, foram selecionados dois cabeçotes, um bloco de motor e uma chapa de Aço Ferrítico Cr-Mo. Foram utilizadas três técnicas não destrutivas, sendo elas, o Ultrassom (US), o Teste de Trincas em Cabeçote (TT) e o Líquido Penetrante (LP). Com os resultados obtidos, pode-se concluir que a técnica do líquido penetrante é mais vantajosa para detecção e caracterização de descontinuidades em relação aos outros testes realizados no trabalho. Apesar disso, cada técnica tem sua aplicação específica e pode ser mais proveitosa em determinadas circunstâncias.

Palavras-chave: Testes Não Destrutivos; Ensaio de Ultrassom; Análise de Trincas; Ensaio de Líquido Penetrante.

ABSTRACT

According to Hellier (2013), a Non-Destructive Test (NDT) is any evaluation performed on any type of test object without altering this object in any way, in order to determine the absence or presence of conditions or discontinuities. Therefore, it is an effective way to obtain information about defects, structural characteristics of the material and to follow how degradation is happening during the life of mechanical components. While END cannot guarantee that failures will not occur, it does play a significant role in minimizing the chances of failure. As a result, it has become an integral part of all industry processes, from raw material examinations to the evaluation of finished products. The objective of this work is to comparatively analyze the suitability of different non-destructive tests in the detection and characterization of discontinuities. For this purpose, two cylinder heads, an engine block and a Cr-Mo Ferritic Steel plate were selected. Three non-destructive techniques were used, namely, the Ultrasound (US), the Crack Test in Headstock (TT) and the Penetrant Liquid (LP). With the results obtained, it can be concluded that the liquid penetrant technique is more advantageous for detecting and characterizing discontinuities in relation to other tests performed at work. Despite this, each technique has its specific application and may be more useful in certain circumstances.

Keywords: Non-Destructive Testing; Ultrasound Test; Crack Analysis; Liquid Penetrant Test.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1 -	Tipos de Descontinuidades Inerentes	18
Figura 2 -	Tipos de Descontinuidades de Processamento Primário.....	19
Figura 3 -	Tipos de Descontinuidades de Soldagem.....	19
Figura 4 -	Tipos de Descontinuidades de Serviço.....	20
Figura 5 -	Técnica de Teste de Contato Pulso-Eco.....	21
Figura 6 -	Técnica de Pulso-Eco com Unidade de Busca Única.....	22
Figura 7 -	Teste de Trincas em Cabeçotes Modelo Testrim.....	23
Figura 8 -	Ensaio Não Destrutivo de Líquido Penetrante.....	25
Figura 9 -	Aparelho de medição de espessura por ultrassom 38DL Plus.....	26
Figura 10 -	Calibração do equipamento com bloco de teste.....	27
Figura 11 -	Chapa de Aço Ferrítico Cr-Mo.....	27
Figura 12 -	Delimitação da área de ensaio.....	28
Figura 13 -	Posicionamento do corpo de prova no Teste de Trincas em Cabeçote.....	28
Figura 14 -	Posicionamento das mangueiras.....	29
Figura 15 -	Superfícies de teste limpas com a aplicação do Removedor de Impurezas Wurth.....	30
Figura 16 -	Superfícies de teste com aplicação do Penetrante Removível à Água.....	30
Figura 17 -	Superfícies de teste com a aplicação do Revelador Removível à Água Wurth.....	31
Figura 18 -	Resultados do Teste do Líquido Penetrante.....	31

Figura 19 - Resultados das medições de espessura por US na região superior do ensaio.....	32
Figura 20 - Resultados das medições de espessura por US na região intermediária do ensaio.....	32
Figura 21 - Resultados das medições de espessura por US na região superior do ensaio.....	32
Figura 22 - Superfícies externas do cabeçote após Teste de Trincas.....	33

TABELA

Tabela 1 - Cronologia dos eventos-chave iniciais de END.....	16
--	----

QUADRO

Quadro 1 - Classificação dos produtos para realização de ensaio por meio de líquido penetrante.....	25
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IFPI	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
END	Ensaio Não Destrutivo
NDT	Non-destructive Testing
ED	Ensaio Destrutivo
US	Teste de Ultrassom
TT	Teste de Trincas em Cabeçote
LP	Teste de Líquido Penetrante
MCI	Motor de Combustão Interna
CO ₂	Dióxido de Carbono
VEB	Veículos Elétricos à Bateria
CRT	Tubos de Raios Catódicos
LCD	Tela de Cristal Líquido
Cr-Mo	Cromo-Molibdênio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL.....	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1	ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.....	15
3.1.1	Resumo histórico	15
3.1.2	Condições para Ensaaios Não Destrutivos Eficazes.....	17
3.2	DESCONTINUIDADES.....	17
3.2.1	Origens	17
3.2.2	Classificação	18
3.2.2.1	Descontinuidades Inerentes	18
3.2.2.2	Descontinuidades de Processamento Primário	19
3.2.2.3	Descontinuidades de Soldagem	19
3.2.2.4	Descontinuidades de Serviço	20
3.3	TESTE ULTRASSÔNICO.....	20
3.4	TESTE DE TRINCAS EM CABEÇOTE.....	22
3.5	TESTE DO LÍQUIDO PENETRANTE.....	23
4	METODOLOGIA.....	26
4.1	CORPOS DE PROVA.....	26
4.2	TESTES NÃO DESTRUTIVOS.....	26
4.2.1	Teste Ultrassônico no Aço Ferrítico Cr-Mo.....	26

4.2.2	Teste de Trincas no Cabeçote Volkswagen.....	28
4.2.3	Teste do Líquido Penetrante no Cabeçote e no Bloco de Motor...	29
5	RESULTADOS.....	31
6	CONCLUSÕES.....	34
7	REFERÊNCIAS.....	35

1 INTRODUÇÃO

Os Ensaios Não Destrutivos (END) são um conjunto de técnicas utilizadas para detectar e avaliar características e descontinuidades, sem causar danos ao material. Eles são utilizados quando os defeitos não são visíveis a olho nu, por isso é necessário o uso de instrumentos ou equipamentos que irão fazer a detecção com base no princípio físico que norteia o ensaio.

Resumidamente, o teste não destrutivo é uma tecnologia valiosa que pode fornecer informações sobre a condição do objeto examinado, uma vez considerados todos os elementos essenciais do teste, seguidos os procedimentos aprovados e os exames realizados por pessoal qualificado. (HELLIER, 2013)

Hodiernamente, a realização de avaliações técnicas que não alterem as propriedades do material é de suma importância para um desenvolvimento tecnológico sustentável. Um grande desafio para os engenheiros é projetar motores com menos emissões de poluentes e maior eficiência energética. O componente crucial para este propósito é o cabeçote, ele comporta as válvulas de admissão e escape, o eixo de comando de válvulas e as velas de ignição. Esses elementos estabelecem a taxa ideal de compressão no motor e a riqueza da mistura ar-combustível através do controle do fluxo de ar dentro e fora dos cilindros com a distribuição correta de combustível.

Com base em Varella (2006), o motor de combustão interna (MCI) foi desenvolvido no século XIX e revolucionou a vida cotidiana das pessoas porque o trabalho manual árduo foi substituído por máquinas. Ele veio para suprir as necessidades não atendidas pelo motor a vapor e tem como principais vantagens uma maior eficiência, potência e vida útil. De forma resumida, o princípio de funcionamento é a conversão de energia química, proveniente da combustão, em energia mecânica. Isso é feito através de ciclos termodinâmicos divididos em diferentes etapas, os mais comuns e amplamente utilizados são os motores alternativos (Diesel e Otto), que trabalham em quatro fases: admissão, compressão, combustão e escape.

Além dos motores à combustão interna, existem inúmeras aplicações que funcionam com base em ciclos termodinâmicos e que também são essenciais para o desenvolvimento da humanidade. No setor de geração de energia por exemplo, as extremas condições de serviço requer um material que suporte temperaturas elevadas. Para isso, são utilizados os aços de liga de cromo-molibdênio que se referem a uma

série de aços de liga ferríticos. Geralmente contém 0,5% a 9% Cr e 0,5% a 1,0% Mo, que em combinação conferem maior resistência à fluência e resistência à corrosão em temperaturas elevadas aos aços-liga. Esta é a razão pela qual é chamado de “resistente ao calor”. Os aços de liga Cr-Mo são amplamente utilizados em caldeiras, refinarias de petróleo, indústrias químicas e usinas termoeletricas a combustíveis fósseis para tubulações, trocadores de calor, tubos de superaquecedores, válvulas, flanges, dutos, parafusos, peças de turbinas a gás, rotores de turbinas a vapor e vasos de pressão.

Na maioria das aplicações de engenharia, para que um componente mecânico desenvolva bem as funções para qual foi projetado, é preciso que a peça não tenha descontinuidades estruturais. Esses defeitos, podem se originar em qualquer etapa da fabricação e podem ser introduzidos durante o uso, manutenção e reparo do componente.

Portanto, a realização dos END na avaliação de defeitos é imprescindível para o desenvolvimento de MCI mais eficientes e com menos emissão de poluentes, como também para a manutenção e reparo de materiais fabricados com aço ferrítico Cr-Mo como o intuito de prolongar a sua vida útil.

A escolha por um determinado procedimento em detrimento de outros métodos é realizada através das possibilidades de detecção que este ensaio é capaz de fornecer. Caso mais de um método possua essa capacidade, pode-se escolher o que mais se adapte à realidade de inspeção. Para a inspeção de descontinuidades na superfície externa ou subsuperficial os principais são: o ensaio visual, líquido penetrante e partículas magnéticas. E para a inspeção de descontinuidades observadas no interior dos materiais os principais são: o ensaio por ultrassom, ensaio radiográfico e a termografia. (OLIVEIRA, 2014)

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar descontinuidades em diferentes corpos de prova, sendo eles, dois cabeçotes, um bloco de motor e um aço ferrítico Cr-Mo, mediante três técnicas de Ensaios Não Destrutivos. Posteriormente, comparar qual desses ensaios é o mais adequado para a detecção e caracterização das descontinuidades.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar o Ensaio de Ultrassom no aço ferrítico Cr-Mo;
- Avaliar o Teste de Trincas no cabeçote;
- Desenvolver o Ensaio de Líquido Penetrante;
- Interpretar os resultados e compreender qual foi o melhor exame realizado para os corpos de prova em questão.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Nos Ensaios Destrutivos (ED), as características quantitativas do corpo de prova como a resistência à tração, resistência à corrosão, ductilidade e dureza, podem ser avaliadas de forma precisa. Porém, essas características são inerentes ao corpo de prova que é examinado e esses testes requerem equipamentos laboratoriais de alto custo. Já nos Ensaios Não Destrutivos (END), as características são obtidas sem danificar ou alterar as propriedades do material, de forma que o corpo de prova analisado pode ser reutilizado após o exame. Dentre outros benefícios, temos a possibilidade de detecção de defeitos internos, de avaliar grandes superfícies e de realizar o teste de forma prática e econômica.

3.1.1 Resumo histórico

É impossível identificar uma data específica que indique exatamente quando os ensaios não destrutivos, como os conhecemos hoje, começaram. Nos tempos antigos, o toque audível de uma lâmina de espada seria uma indicação de quão forte o metal seria em combate. Essa mesma técnica foi usada por décadas por ferreiros e pelos primeiros fabricantes de sinos. (HELLIER, 2013)

A Tabela 1 lista alguns dos principais eventos na cronologia do END e os indivíduos que foram os principais responsáveis por esses desenvolvimentos. Certamente houve muitos outros indivíduos que fizeram contribuições significativas para o crescimento do END, mas é impossível citar todos eles.

TABELA 1 - CRONOLOGIA DOS EVENTOS-CHAVE INICIAIS DE END

1800	Primeiras observações termográficas por Sir William Herschel.
1831	Primeira observação de indução eletromagnética por Michael Farraday.
1840	Primeira imagem infravermelha produzida pelo filho de Herschel, John.
1868	Primeira referência ao teste de partículas magnéticas relatada por S. H. Saxby, observando como canos de armas magnetizados afetam uma bússola.
1879	Uso precoce de correntes parasitas para detectar diferenças de condutividade, permeabilidade e temperatura iniciada por E. Hughes.
1880-1920	Técnica de "óleo e badejo", precursora do teste penetrante atual usado para eixos ferroviários e placas de caldeira.
1895	Raios-X descobertos por Wilhelm Conrad Roentgen.
1898	Rádio descoberto por Marie e Pierre Curie.
1922	Radiografia Industrial para metais desenvolvida pelo Dr. H. H. Lester.
1927-28	Indução de corrente elétrica/sistema de detecção de campo magnético desenvolvido pelo Dr. Elmer Sperry e H. C. Drake para a inspeção da ferrovia.
1929	Testes/equipamentos de partículas magnéticas pioneiros por A. V. deForest e F. B. Doane.
1929	Primeiros experimentos usando transdutores de quartzo para criar vibrações ultrassônicas. Os materiais foram conduzidos por S. Y. Sokolov na Rússia.
1930	Usos práticos para radiografia gama usando rádio foram demonstrados pelo Dr. Robert F. Mehl.
1935-1940	Técnicas penetrantes desenvolvidas por Betz, Doane e DeForest.
1935-1940	Desenvolvimentos de instrumentos atuais Eddy por H. C. Knerr, C. Farrow, Theo Zuschlag, e Dr. F. Foerster.
1940-1944	Método de teste ultrassônico desenvolvido nos Estados Unidos pelo Dr. Floyd Firestone.
1942	Primeiro detector de falhas ultrassônico usando pulso-eco introduzido por D. O. Sproule (Reino Unido).
1946	O primeiro instrumento de medição de espessura ultrassônico portátil, o Audigage, foi apresentado por Branson.

1950	Emissão acústica introduzida como método de END por J. Kaiser.
MEADOS DE 1950	Primeiros instrumentos de varredura B e C de imersão de teste ultrassônico desenvolvidos por Donald C. Erdman.

Fonte: HELLIER (2013)

3.1.2 Condições para Ensaios Não Destrutivos Eficazes

Para a realização de cada método de END é preciso que algumas condições sejam estabelecidas para que ele seja considerado eficaz. Os testes Radiografia, Ultrassom, Térmico Infravermelho e o de Emissão Acústica precisam de um equipamento para que sejam executados, logo, é necessário que ele esteja calibrado e em boas condições de operação. Embora os testes de Líquido Penetrante, Partículas Magnéticas e Correntes Parasitas não dependam de instrumentos específicos, todos os ensaios obrigatoriamente devem ser conduzidos por um profissional devidamente qualificado e certificado.

3.2 DESCOTINUIDADES

3.2.1 Origens

Os desvios espacialmente nítidos da homogeneidade e continuidade do material dentro de um componente em qualquer nível de ampliação são chamados de descontinuidades. Materiais de engenharia sempre possuem algumas descontinuidades, embora possam ser muito pequenas, e podem ou não serem aceitáveis. Exemplos dessas descontinuidades incluem vazios, inclusões, dobras, trincas, rachaduras, segregação química e mudanças locais na microestrutura. (HELLIER, 2013)

As origens das descontinuidades estão associadas ao processo de fabricação do material, a forma de uso da peça e quais tipos de carregamento ela é submetida. Elas podem surgir a qualquer momento da vida útil do componente mecânico e tem potencial de causar graves acidentes se a falha vier a acontecer de fato.

3.2.2 Classificação

O objetivo da inspeção não destrutiva é determinar se o objeto que está sendo inspecionado deve ser aceito ou rejeitado. Durante a inspeção, o inspetor procura descontinuidades no objeto e identifica sua natureza e tamanho. Em seguida, essas discordâncias são avaliadas de acordo com um critério de aceitação para determinar se são consideradas defeitos (a presença de defeitos faz com que o objeto seja rejeitado). (ISPATGURU, 2020)

Conforme o autor, deve ficar claro que uma descontinuidade não é necessariamente um defeito. Qualquer imperfeição encontrada pelo inspetor é chamada de descontinuidade até que possa ser identificada e avaliada quanto ao efeito que terá no serviço da peça ou nos requisitos da especificação. Uma certa descontinuidade pode ser considerada um defeito em alguns casos e um não defeito em outros, porque a defesa do defeito muda com o tipo de componente, sua construção, seus materiais e as especificações ou códigos utilizados.

3.2.2.1 Descontinuidades Inerentes

São as descontinuidades causadas na produção de ligas durante o processo inicial de fundição do metal líquido. A Figura 1, ilustra os tipos de descontinuidades inerentes:

Figura 1 - Tipos de Descontinuidades Inerentes

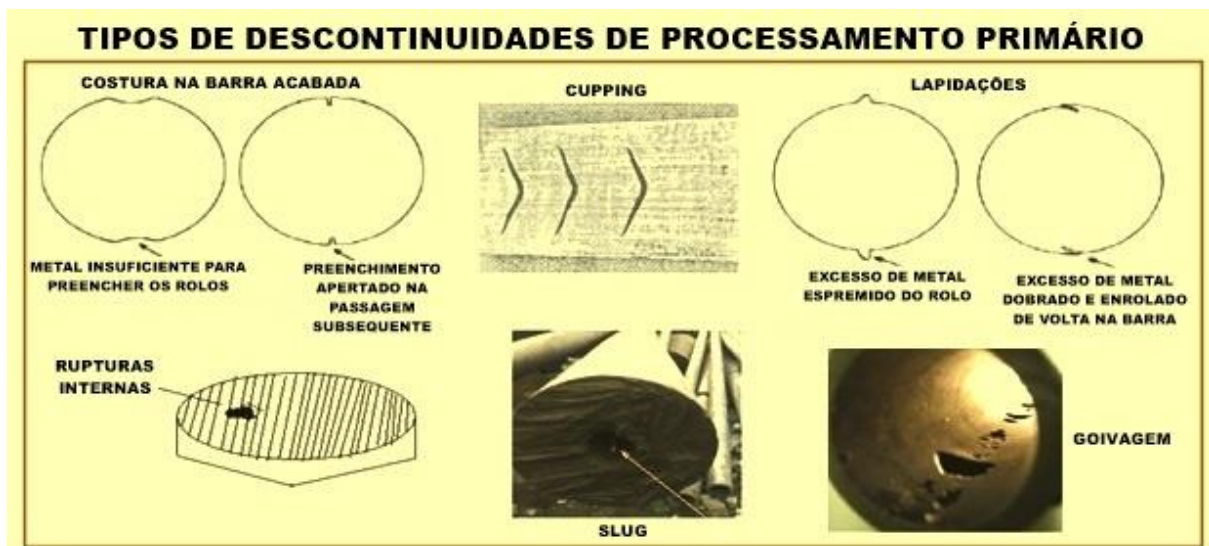


Fonte: Ispatguru (2020)

3.2.2.2 Descontinuidades de Processamento Primário

Referem-se às descontinuidades que se originam durante os processos de conformação a quente ou a frio, como laminação, forjamento, extrusão, trefilação e soldagem. Além disso, algumas das descontinuidades inerentes ao material podem se propagar e se tornarem significativas. A Figura 2, ilustra os tipos de descontinuidades de processamento primário: (ISPATGURU, 2020)

Figura 2 - Tipos de Descontinuidades de Processamento Primário

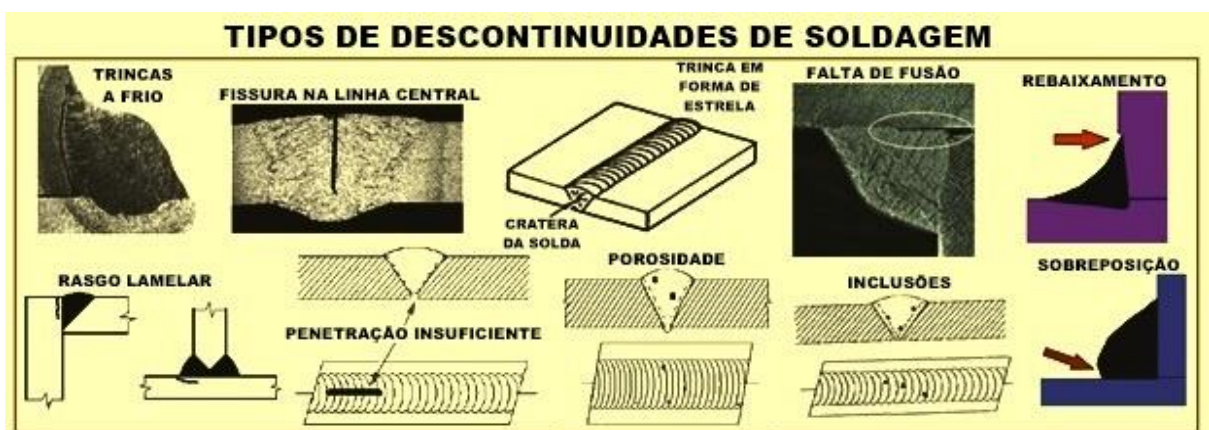


Fonte: Ispatguru (2020)

3.2.2.3 Descontinuidades de Soldagem

Elas também são pertencentes às descontinuidades de processamento primário, porém são resultantes exclusivas do processo de soldagem. A Figura 3, ilustra os tipos de descontinuidades de soldagem:

Figura 3 - Tipos de Descontinuidades de Soldagem



Fonte: Ispatguru (2020)

3.2.2.4 Descontinuidades de Serviço

Essas descontinuidades se originam ou se desenvolvem enquanto o material está em serviço. As condições de serviço (carga, manutenção, ambiente mecânico e químico) do material afetam sua vida útil. Embora a maioria das descontinuidades de serviço possam parecer de alguma forma semelhantes, elas são causadas por diferentes mecanismos de falha. A Figura 4, ilustra os tipos de descontinuidade de serviço: (ISPATGURU, 2020)

Figura 4 - Tipos de Descontinuidades de Serviço



Fonte: Ispatguru (2020)

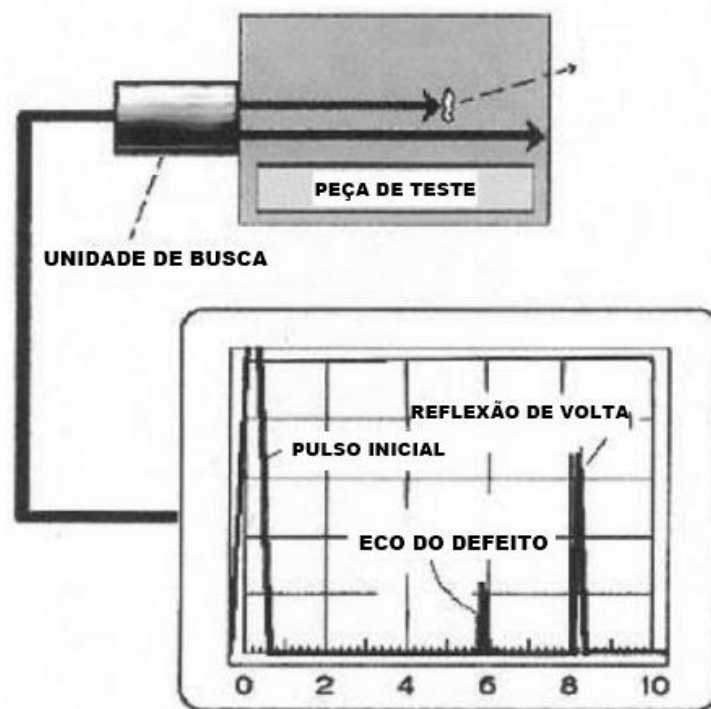
3.3 TESTE ULTRASSÔNICO

Consoante com LANGENBERG et. al. (2012), desde os tempos antigos o ser humano utiliza a energia sonora para determinar a integralidade de objetos cerâmicos e metálicos. Uma pancada forte em um objeto sólido cria uma vibração na frequência natural do objeto, qualquer grande ruptura da homogeneidade do objeto distorcerá essa frequência natural e indicará que há um problema. No entanto, o ouvido humano só consegue captar ondas sonoras com frequência entre 20Hz e 20.000Hz e acima desse intervalo as ondas são consideradas ultrassônicas. As menores descontinuidades só são detectáveis por meio de instrumentos capazes de gerar e detectar ondas sonoras ultrassônicas.

É uma sorte que existem dispositivos chamados "transdutores" que convertem as ondas sonoras em energia elétrica que pode ser exibida como sinais visuais em um tubo de raios catódicos (CRT) ou tela de cristal líquido (LCD). Isso permite que todos os sons, incluindo aqueles fora do alcance audível, sejam detectados e estudados. (HELLIER, 2013)

De acordo com Paul E. Mix (2005), quando um cristal piezoelétrico é acionado por pulsos elétricos de alta tensão, o cristal “soa” em sua frequência ressonante e produz rajadas curtas de vibrações de alta frequência. Esses “trens de ondas sonoras” gerados pelo ultrassom transdutor ou “unidade de busca” são transmitidos para o material que está sendo testado. Quando a unidade de busca está em contato direto com o material de teste, a técnica é conhecida como teste de “contato”. Se houver falhas ou descontinuidades, ocorre uma incompatibilidade acústica e parte ou toda a energia ultrassônica é refletida de volta para a unidade de busca. O cristal piezoelétrico na unidade de busca converte a onda sonora refletida ou “eco” de volta em pulsos elétricos cujas amplitudes estão relacionadas às características da falha e cujo tempo de viagem ou *tempo de voo* através do material são proporcionais à distância da falha da superfície de entrada. Os pulsos ultrassônicos também são refletidos da superfície traseira do material e este sinal representa a distância total percorrida. O pulso recebido da superfície traseira também pode representar a largura, comprimento ou espessura do material dependendo de sua orientação. A Figura 5, ilustra como acontece a técnica pulso-eco:

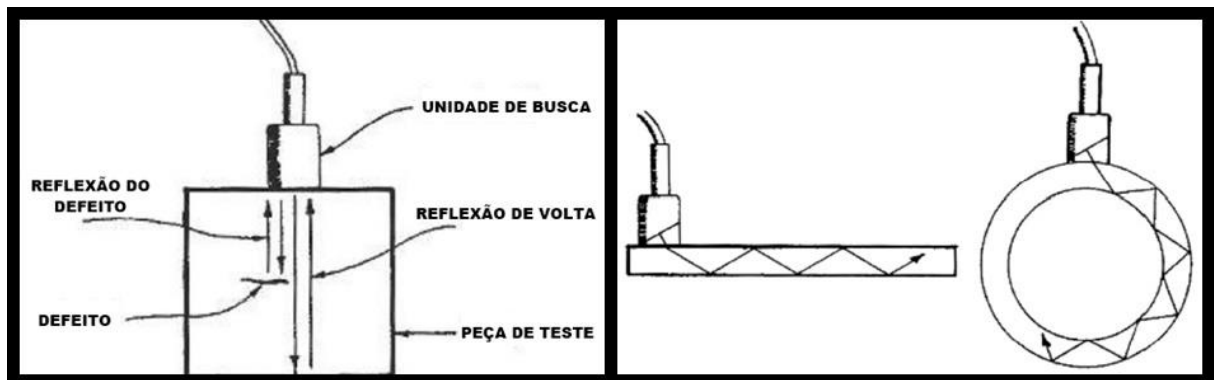
Figura 5 - Técnica de Teste de Contato Pulso-Eco



Fonte: Paul E. Mix (2005)

As unidades de busca podem ser de feixe reto ou feixe angular. A primeira, projetam vibrações ultrassônicas perpendicularmente à superfície de teste e é eficaz na detecção de falhas paralelas, laminares ou planares em placas. Já na segunda, o ângulo dos feixes é predeterminado em relação à superfície de entrada e pode ser usado para testar chapas planas, placas ou tubulações. A Figura 6, ilustra os dois tipos de feixes:

Figura 6 - Técnica de Reflexão Pulso-Eco com Unidade de Busca Única



Fonte: Paul E. Mix (2005)

3.4 TESTE DE TRINCAS EM CABEÇOTE

O teste de trincas em cabeçote é feito por uma máquina específica para essa finalidade. Esse tipo de ensaio é mais simples por ser automatizado e de fácil maneabilidade. Basicamente, o cabeçote é fixado ao equipamento, depois uma mangueira de ar é inserida na entrada de ar do cabeçote e uma mangueira de água é introduzida na entrada de água do sistema de arrefecimento da peça. Para simular as condições reais de funcionamento do motor, a máquina aquece o sistema até uma temperatura de 90°C. Quando atinge essa temperatura, os sistemas hidráulico e pneumático são acionados injetando água e ar quente para dentro do cabeçote. Caso tenha alguma trinca externa superficial é possível detectá-la porque haverá vazamento indicando o local da falha. A Figura 7, ilustra o equipamento de Teste de Trincas em Cabeçote:

Figura 7 - Teste de Trincas em Cabeçotes Modelo Testrim



Fonte: Retirado do site www.chinelatto.com.br

3.5 TESTE DO LÍQUIDO PENETRANTE

O método do líquido penetrante foi revivido em 1941, quando Robert e Joseph Switzer descobriram que a adição de corantes visíveis e fluorescentes ao penetrante melhorou muito a técnica. O trabalho de desenvolvimento contínuo neste campo nos levou aos corantes, penetrantes, emulsificantes e reveladores aprimorados de hoje. Hoje, o teste de líquido penetrante é mais confiável do que o teste radiográfico para localizar pequenas descontinuidades na superfície. Os penetrantes são classificados ou subdivididos pelo método usado para remover o excesso de penetrante, como “lavável com água” e “limpo com solvente”. Um bom penetrante deve penetrar em aberturas muito finas, permanecer em aberturas relativamente grossas, ter boa molhabilidade e ser facilmente removido da superfície após o teste. Também deve ser inerte em relação aos materiais que estão sendo testados, não ser tóxico, ter um alto ponto de fulgor e ser relativamente barato. (MIX, 2005)

Em congruência com a Norma N-1596 da CONTEC, as principais etapas realização do teste são realizadas da seguinte maneira:

1. Preparação de Superfície: Todas as superfícies de um componente devem ser completamente limpas e completamente secas antes de ser submetido à inspeção.
2. Aplicação do Penetrante: Após a preparação da superfície, o líquido penetrante é aplicado em uma forma, de modo a formar uma película de penetrante sobre a superfície do componente. O filme líquido deve permanecer na superfície por um período suficiente para permitir a penetração total nos defeitos da superfície. O período de tempo que o penetrante está em contato com o componente é importante. O penetrante vai se infiltrar em grandes falhas em poucos segundos, mas pode levar até 30 minutos para o líquido penetrar em defeitos muito pequenos e rachaduras apertadas.
3. Remoção do Excesso de Penetrante: Agora é necessário remover o excesso de penetrante da superfície do componente. Alguns penetrantes podem ser lavados da superfície com água, enquanto outros requerem o uso de solventes. A remoção uniforme do penetrante em excesso é necessária para inspeção eficaz.
4. Desenvolvimento: O estágio de desenvolvimento é necessário para revelar claramente a presença de qualquer defeito. Isso pode ser aplicado a seco, mas mais comumente é aplicado pulverizando a superfície com pó de giz suspenso em um volátil fluido transportador. Uma fina camada uniforme de giz é depositada na superfície do componente. O líquido penetrante presente dentro de defeitos será lentamente puxado por ação capilar para os poros do giz. O estágio de desenvolvimento pode ser omitido quando um penetrante fluorescente é usado.
5. Avaliação e Inspeção: A inspeção deve ser feita em boas condições de iluminação, se o penetrante é do tipo visível (cor contrastante com o revelador) ou sob luz negra, em uma área escurecida, se o penetrante é fluorescente.

6. Limpeza pós-teste: Este último passo é geralmente obrigatório. A limpeza de todos os produtos resíduos, o que poderia prejudicar uma etapa posterior de trabalho da peça, deve ser completamente removido da peça e/ou componente.

Com base nas Normas N-1596 e N-2370 da CONTEC, o Quadro 1 indica a classificação dos produtos para realização de ensaio por meio de líquido penetrante:

QUADRO 1 – CLASSIFICAÇÃO DOS PRODUTOS PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIO POR MEIO DE LÍQUIDO PENETRANTE					
Penetrante		Remoção do Excesso de Penetrante		Revelador	
Tipo	Designação	Método	Designação	Forma	Designação
I	Penetrante fluorescente	A	Água	a	Seco
II	Penetrante de contraste colorido	B	Emulsificante lipofílico	b	Solúvel em água
		C	Solvente	c	Em suspensão na água
		D	Emulsificante hidrofílico	d	Diluído em solvente

Fonte: CONTEC (2003)

Os penetrantes líquidos são selecionados com base em sua capacidade de penetração e os corantes são selecionados por seu brilho. Os corantes coloridos devem ser facilmente vistos em luz visível e corantes fluorescentes devem ser facilmente vistos em ultravioleta ou “preto”. Na realidade, apenas uma pequena quantidade de corante é retirada da descontinuidade durante o desenvolvimento. Portanto, o corante deve ser altamente visível aos olhos e fornecem um alto grau de contraste com a cor do revelador de fundo. (MIX, 2005)

Figura 8 – END de Líquido Penetrante



Fonte: Retirado do site www.inspbrasil.com.br

4 METODOLOGIA

4.1 CORPOS DE PROVA

Foram selecionados quatro corpos de prova para a realização dos ensaios. Um cabeçote de uma caminhonete L200 Triton com 16 válvulas, um cabeçote Volkswagen de Motor AP com 8 válvulas, um bloco de motor Mercedes Benz OM366 e uma amostra de Aço Ferrítico Cr-Mo. Primeiramente foi executado o Teste Ultrassônico no Aço Ferrítico Cr-Mo. Posteriormente, o Teste de Trincas em Cabeçote foi feito para detecção de trincas superficiais externas no cabeçote Volkswagen. E por último, foi realizado o Teste do Líquido Penetrante no cabeçote da L200 e no bloco do motor Mercedes.

4.2 TESTES NÃO DESTRUTIVOS

4.2.1 Teste Ultrassônico no Aço Ferrítico Cr-Mo

Para o ensaio, foi utilizado o medidor de espessura por ultrassom 38DL PLUS do fabricante Olympus. O transdutor usado foi de elemento duplo modelo D7906-SM, que faz a medição da espessura de metais verdadeiros e do revestimento com um único eco de parede traseira. A faixa de espessura é de 0,080 mm a 635,00 mm. A Figura 9 ilustra o aparato experimental do teste:

Figura 9 – Aparelho de medição de espessura por ultrassom 38DL Plus



Fonte: Autoria Própria

Para a calibração do zero, foi usado um bloco de teste (com espessura conhecida) de 38,5 milímetros. Foi colocada uma gota do acoplante na superfície do bloco de teste e realizada a correção da medição conforme a figura a seguir:

Figura 10 – Calibração do equipamento com bloco de teste



Fonte: Autoria Própria

A peça do Aço Ferrítico Cr-Mo foi selecionada no Laboratório de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central. A Figura 11 ilustra a amostra da chapa:

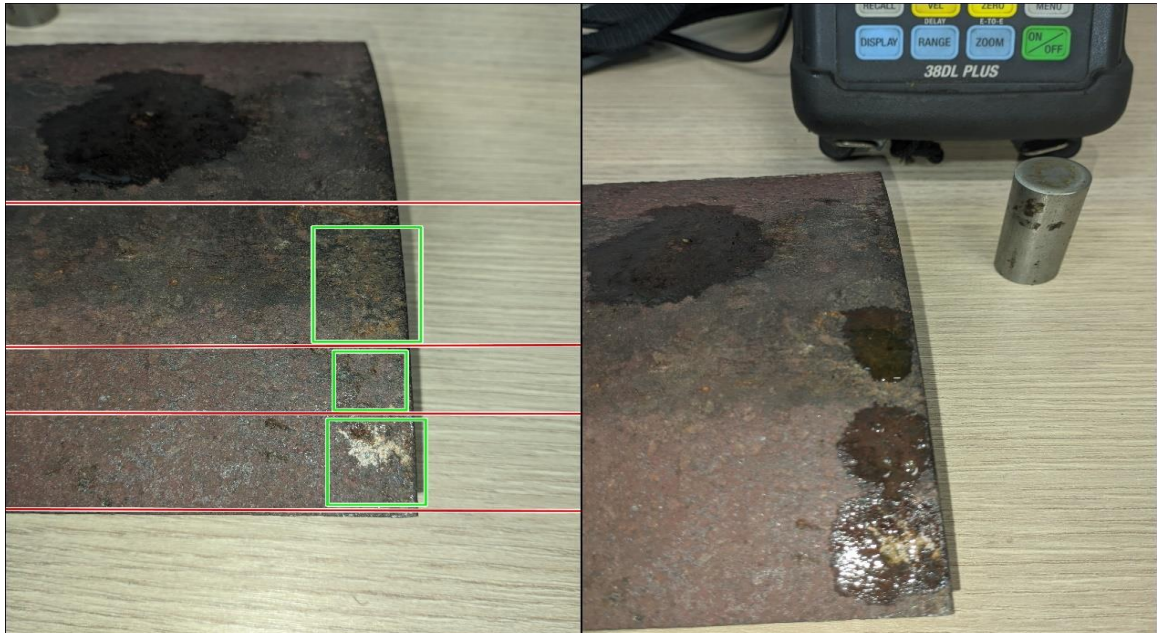
Figura 11 – Chapa de Aço Ferrítico Cr-Mo



Fonte: Autoria Própria

E para realizar as medições, foi delimitada a área de ensaio em uma região da chapa onde é visível a presença de corrosão na parte superior e inferior, enquanto na região intermediária não é nítida a presença de defeitos congruente com a Figura 12:

Figura 12 – Delimitação da área de ensaio



Fonte: Autoria Própria

4.2.2 Teste de Trincas no Cabeçote Volkswagen

Na oficina mecânica Faro Certo, foi escolhido o cabeçote Volkswagen de Motor AP com 8 válvulas para o ensaio no equipamento de teste de trincas em cabeçotes modelo Testrim. A Figura 13 mostra como foi posicionado o cabeçote no compartimento da máquina de teste:

Figura 13 – Posicionamento do corpo de prova no Teste de Trincas em Cabeçote



Fonte: Autoria Própria

Após o acionamento da máquina, foi preciso o tempo de trinta minutos para o sistema alcançar a temperatura de 90 °C. Com essa temperatura, é possível simular o funcionamento real de um MCI conectando as mangueiras que irão injetar água e ar quente conforme a Figura 14:

Figura 14 – Posicionamento das mangueiras



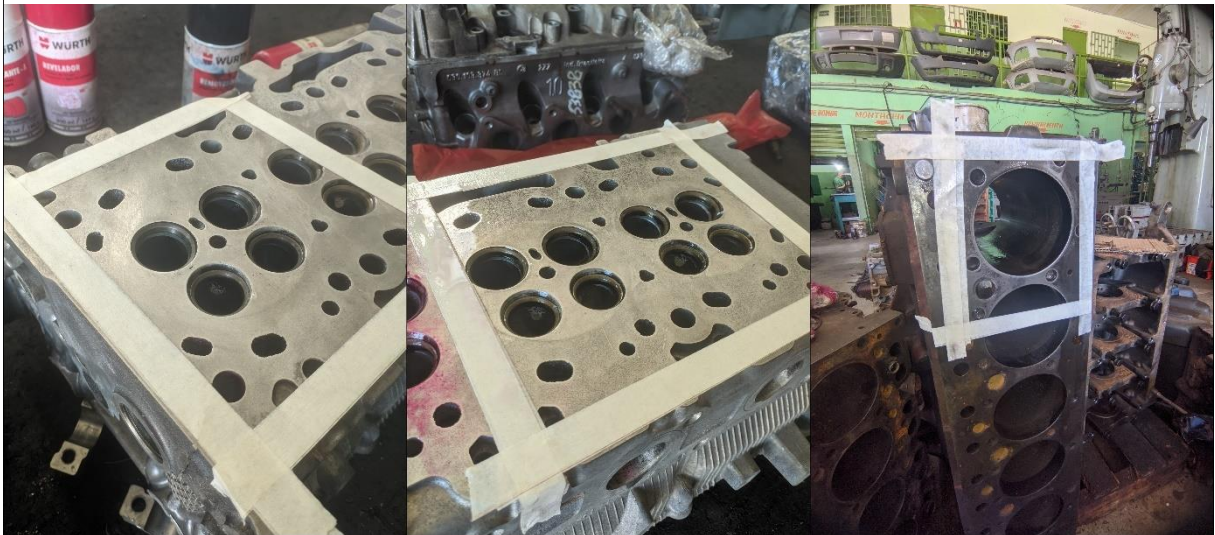
Fonte: Autoria Própria

4.2.3 Teste do Líquido Penetrante no Cabeçote e no Bloco de Motor

Na oficina mecânica Faro Certo, foram selecionadas duas peças que apresentaram falhas durante o funcionamento, sendo elas, um cabeçote de uma caminhonete L200 Triton com 16 válvulas e um bloco de motor Mercedes Benz OM366, com o objetivo de detectar discontinuidades superficiais das peças.

Para a execução do teste, as superfícies dos corpos de provas foram devidamente preparadas com uma limpeza e aplicação do Removedor de Impurezas Wurth, conforme a Figura 15:

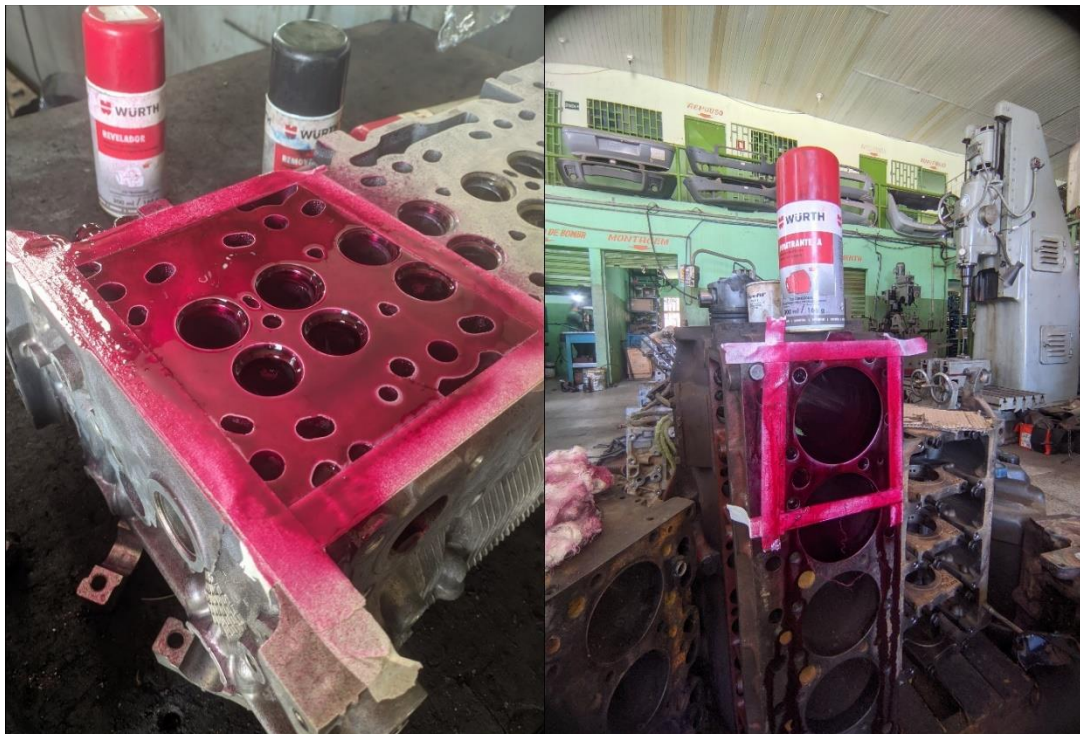
Figura 15 – Superfícies de teste limpas com a aplicação do Removedor de Impurezas Wurth



Fonte: Autoria Própria

Em seguida, foi aplicado o Penetrante Removível à Água Wurth com tempo de infiltração de 30 minutos. A Figura 16 ilustra a aplicação do penetrante:

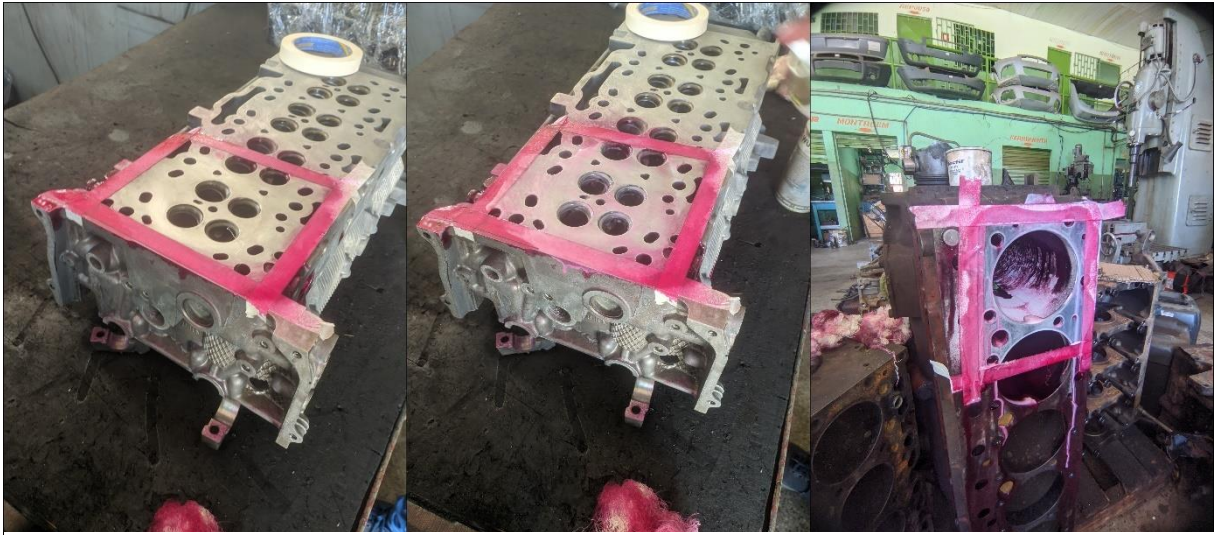
Figura 16 – Superfícies de teste com aplicação do Penetrante Removível à Água



Fonte: Autoria Própria

Logo após, foi removido o excesso de penetrante e aplicado o Revelador Removível à Água Wurth de acordo com a Figura 17. Os resultados são visíveis após o tempo de 30 minutos.

Figura 17 – Superfícies de teste com a aplicação do Revelador Removível à Água Wurth



Fonte: Autoria Própria

5 RESULTADOS

Com o Teste do Líquido Penetrante, foi possível visualizar que o cabeçote da caminhonete L200 Triton não indicou trincas superficiais e o bloco de motor Mercedes Benz OM366 apresentou uma trinca na área de superfície entre o primeiro e o segundo cilindro do bloco. Portanto, como não pode haver a entrada de óleo lubrificante ou do líquido de arrefecimento para dentro dos cilindros, o bloco do motor foi descartado por causa da trinca detectada. A Figura 18 ilustra os resultados obtidos:

Figura 18 – Resultados do Teste do Líquido Penetrante



Fonte: Autoria Própria

Na análise Ultrassônica do Aço Ferrítico Cr-Mo, foram realizadas três medições em cada área de ensaio das regiões delimitadas. Foi perceptível uma redução de espessura devido à corrosão de aproximadamente 0,1 mm nas regiões onde a presença de defeitos era nítida (superior e inferior). Para a região superior da área de ensaio foram executadas as medições da Figura 19:

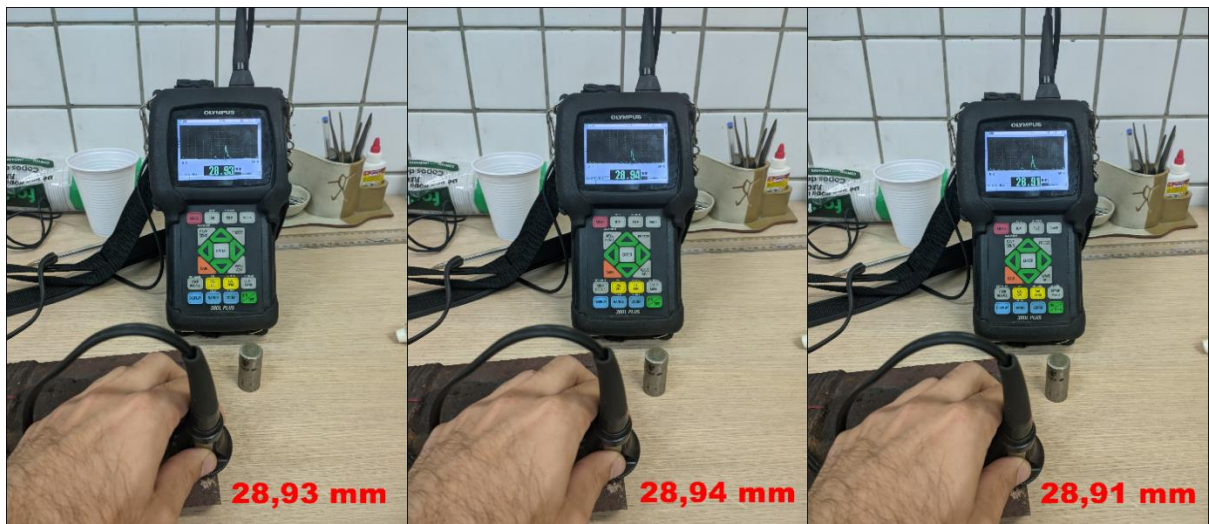
Figura 19 – Resultados das medições de espessura por US na região superior do ensaio



Fonte: Autoria Própria

A Figura 20 mostra os resultados das medições da região intermediária:

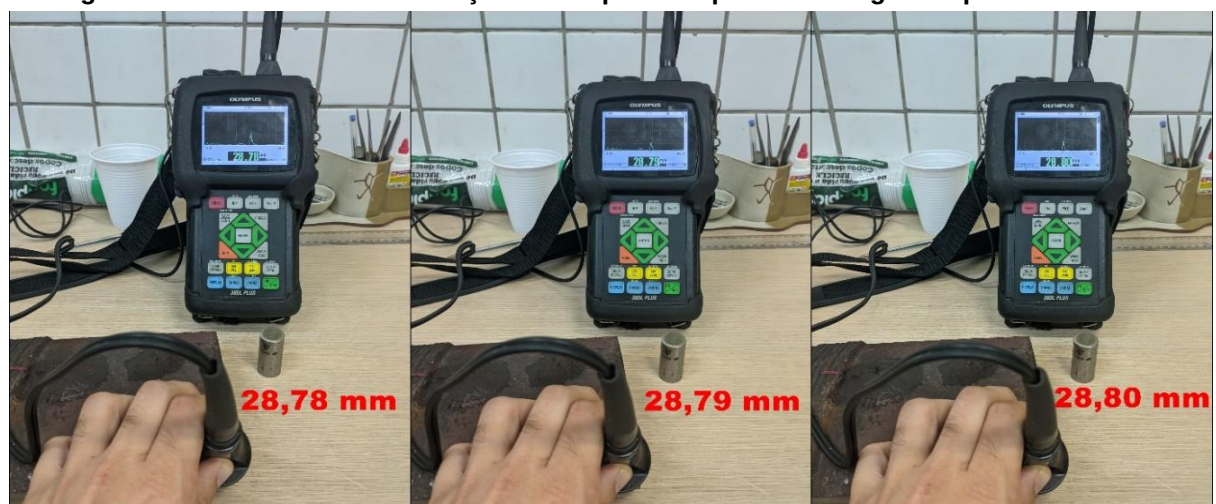
Figura 20 - Resultados das medições de espessura por US na região intermediária do ensaio



Fonte: Autoria Própria

Por fim, a Figura 21 ilustra os resultados da região inferior da área delimitada:

Figura 21 - Resultados das medições de espessura por US na região superior do ensaio



Fonte: Autoria Própria

No Teste de Trincas em Cabeçote, o cabeçote Volkswagen de Motor AP com 8 válvulas não apresentou trincas. A Figura 22, ilustra o resultado de todas as faces superficiais externas.

Figura 22 – Superfícies externas do cabeçote após Teste de Trincas



Fonte: Autoria Própria

Caso o cabeçote tivesse trincas superficiais externas, com a alta pressão e temperatura do sistema, iria ocorrer algum vazamento de água e assim poderia ser identificada a descontinuidade. Como o corpo de prova passou no teste, foi eliminada a hipótese de trincas e o cabeçote foi direcionado para outras inspeções técnicas no intuito de identificar qual motivo da falha apresentada pela peça.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados, foi possível concluir que:

1. O teste ultrassônico com o medidor de espessura 38DL Plus se mostrou eficaz para detectar defeitos que alterem a espessura do material, como os que ocorrem em aços deteriorados pela oxidação, corrosão ou ferrugem. Ele fornece resultados precisos e com alta sensibilidade de forma rápida, e é indicado para locais onde o inspetor só tem acesso a um lado da peça, ou onde a medição mecânica simples é impossível, ou impraticável devido ao tamanho da peça, ou até mesmo devido às limitações de acesso. Pode ser utilizado em caldeiras, vasos de pressão, tubulações, aquecedores, tanques de armazenamento, entre outras aplicações.
2. Entretanto, tal técnica não é eficaz para detecção e dimensionamentos de fendas, vazios, desvios e descontinuidades ocultas. O equipamento é limitado somente para medições de espessuras e com ele não é possível obter características qualitativas sobre os defeitos.
3. O teste de trincas em cabeçotes é ideal para detecção de trincas superficiais externas com o propósito de diagnosticar o motivo da falha em funcionamento. No entanto, sua aplicação é específica para cabeçotes e se restringe ao ambiente de retífica de motores.
4. Já o teste do líquido penetrante, foi o mais benéfico dentre os três ensaios realizados. Apesar das condições de superfície, que deve ser relativamente lisa e livre de contaminantes, ele não precisa de equipamentos específicos, é extremamente sensível e versátil. Além do custo que é bem inferior aos demais.
5. A partir dessas observações, pode-se concluir que a técnica do líquido penetrante é mais vantajosa para detecção e caracterização de descontinuidades em relação aos outros testes realizados no trabalho. Apesar disso, não é possível concluir que ela é a melhor, pois a técnica de medição de espessura por ultrassom e o teste de trincas em cabeçotes têm suas aplicações específicas e podem ser mais proveitosas em determinadas circunstâncias.

7 REFERÊNCIAS

HELLIER, Charles J. **Handbook of nondestructive evaluation**. McGraw-Hill Education, 2013.

MIX, Paul E. **Introduction to nondestructive testing: a training guide**. John Wiley & Sons, 2005.

TONIAL, Ivan Ramalho. **Susceptibilidade de diferentes ensaios não destrutivos para indicação de trincas de fadiga**. Rio de Janeiro, 2017. 120p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

OLIVEIRA, Márcio Jardim de Oliveira. **Indicação de descontinuidades em materiais metálicos e compósitos: uma comparação entre métodos não destrutivos**. Rio de Janeiro, 2014. 140 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia de Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

DE O CARNEVAL, Ricardo et al. **Uso das técnicas de END: ultra-som (TOFD e phased array), radiografia, partículas magnéticas e ACFM na avaliação de juntas soldadas com trincas de fadiga**. 2007.

VARELLA, Carlos Alberto Alves. Histórico e desenvolvimento dos motores de combustão interna. **Apostila didática da disciplina IT**, 2006.

MATERIAL DISCONTINUITIES AND THEIR TYPES. **Ispatguru**, 2020. Disponível em: <https://www.ispatguru.com/material-discontinuities-and-their-types/>. Acesso em: 04 set. 2022.

INSPEÇÃO POR LÍQUIDO PENETRANTE. **Inspbrasil**, 2022. Disponível em: <http://inspbrasil.com.br/inspecao/solucoes/inspecao-liquido-penetrante/>. Acesso em: 04 set. 2022.

JENSEN, Todd; KARAM, P. Andrew. The Internal Combustion Engine. **Encyclopedia.com**. 25 ago. 2022. Disponível em: <https://www.encyclopedia.com/science/encyclopedias-almanacs-transcripts-and-maps/internal-combustion-engine-0>. Acesso em: 04 set. 2022.

COMISSÃO DE NORMAS TÉCNICAS DA PETROBRAS. **N-1596**: Ensaio Não-Destrutivo – Líquido Penetrante. Rio de Janeiro, 2003.10 p.

COMISSÃO DE NORMAS TÉCNICAS DA PETROBRAS. **N-2370**: Líquido Penetrante. Rio de Janeiro, 2003.13 p.

OMAR, Mohammad (Ed.). **Nondestructive Testing Methods and New Applications**. BoD–Books on Demand, 2012.

LANGENBERG, Karl-Jörg; MARKLEIN, René; MAYER, Klaus. **Ultrasonic nondestructive testing of materials: theoretical foundations**. CRC Press, 2012.