

EDUARDO CASAGRANDE

Estudo em disco de freio metroferroviário, fabricado pelo processo de fundição, cubo forjado aço A36 e pista de ferro fundido cinzento FC 250 – ensaio de líquido penetrante.

São Paulo
2016

EDUARDO CASAGRANDE

Estudo em disco de freio metroferroviário, fabricado pelo processo de fundição, cubo forjado aço A36 e pista de ferro fundido cinzento FC 250 – ensaio de líquido penetrante.

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Especialista em Tecnologia Metroferroviária.

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Gilmar Ferreira
Batalha

São Paulo
2016

FICHA CATALOGRAFICA

Casagrande, Eduardo

Estudo em disco de freio metroferroviário, fabricado pelo processo de fundição, cubo forjado aço A36 e pista de ferro fundido cinzento FC 250 – ensaio de líquido penetrante. / E. Casagrande – São Paulo, 2016.

62 p.

Monografia (Especialização em Tecnologia Metroferroviária) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.disco de freio 2.Ferro Fundido 3.Ensaio de Líquido Penetrante
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha, pela atenção e apoio durante o processo de definição e orientação.

A Companhia do Metropolitano de São Paulo - METRÔ e à Secretaria dos Transportes Metropolitanos – STM, que nos propiciaram a realização deste curso.

A Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, através de seu Programa de Educação Continuada em Engenharia - PECE.

Aos colegas de curso e colaboradores neste trabalho – Alexandre Caetano Godoy, José Luciano Esterque, Carlos José Monteiro, Msc. Rafael Rocha Maia e Professor Titular PhD André Paulo Tschipstchin.

Aos nossos familiares, pelo apoio e compreensão em todos os momentos.

As pessoas que direta ou indiretamente nos auxiliaram no decorrer do nosso trabalho:

- Gerência de Logística – Almir Gonçalves, Gustavo Celso de Q. Mazzariol, Iverson Martins de C. Martelli e Pericles Fernando Nucci.
- Gerência de Manutenção – Jorge Francisco da Silva, Julius Cezar Baracho;

RESUMO

O objetivo deste trabalho é buscar a melhoria da parte do processo de inspeção do disco de freio utilizado nos metrocarros para ser aplicado pelas Gerências de Logística e Manutenção da CMSP na verificação de falhas no processo de fabricação e do produto final disco de freio. Este estudo visa analisar a junção entre o cubo de aço com a pista de ferro fundido cinzento do disco de freio, através da aplicação de líquido penetrante com a finalidade de verificar de forma rápida e segura os possíveis defeitos ocorridos durante o processo de fabricação. Buscou-se utilizar este método, por apresentar resultados satisfatórios e confiáveis na análise dos discos no recebimento e/ou inspeção em fábrica, de modo não destrutivo. De acordo com a proposta de um trabalho de conclusão de curso, este estudo se concentrou na junção cubo forjado e pista fundida, pois é nesta junção onde observamos um grande número de falhas de destacamento entre as partes durante a operação. Neste estudo não consideramos alterações de materiais, fadigas e desempenho, embora também apresentam importantes características a serem estudadas.

ABSTRACT

The purpose of this project is to achieve better inspection process of brake discs which are installed in passenger rail cars. This inspection will be applied in Metrô-SP Logistics and Maintenance Departments in failures inspection regarding manufacturing and product process. This study aims the analysis of the joint between the wheel hub and the brake disc made of gray cast iron, by applying penetrating liquids in this area, in order to verify in a fast and safe way possible defects during the manufacturing process. This method was chosen because it has been successful and reliable on the brake analysis during the receiving or inspection phase, in a non-destructible way. This work has been focused of the joint between the wheel hub and the brake disc because this is the critical area which has been observed during the many failure occurrences, where there is a split during the operation. This study does not consider material quality, fatigue and performance, however these factors shall be important in further studies.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.	Montagem típica dos discos de freio	16
Figura 2.	Truque do metrocarros Alstom	17
Figura 3.	Unidade de freio vista lateral	17
Figura 4.	Disco de freio	18
Figura 5.	Detalhe típico da junção “rabo de andorinha”	19
Figura 6.	Padrões de grafita	21
Figura 7.	Esquema básico de processo de fundição	22
Figura 8.	Representação de ensaio de ultrassom	25
Figura 9.	Aplicação do líquido penetrante	27
Figura 10.	Revelação da trinca	27
Figura 11.	Capilaridade dos líquidos	30
Figura 12.	Gráfico de tensão X deformação	33
Figura 13.	Detalhe do disco de freio	36
Figura 14.	Limpeza das superfícies	36
Figura 15.	Posicionamento do disco e local de aplicação	37
Figura 16.	Posicionamento do disco e local de aplicação	37
Figura 17.	Região a ser observada	37
Figura 18.	Quadrantes	38
Figura 19.	Detalhe do “Rabo de andorinha” usinado	39
Figura 20.	Detalhe da usinagem	40
Figura 21.	Usinagem da pista do disco de freio	40
Figura 22.	Prensa hidráulica	41
Figura 23.	Aplicação da força	42
Figura 24.	Detalhes do cisalhamento	44
Figura 25.	Detalhe do disco de freio após aplicação da força	44
Figura 26.	Máquina de ensaios universais	45
Figura 27.	Dispositivo do ensaio de tração	46
Figura 28.	Área do corpo de prova	47
Figura 29.	Ensaio de tração	47
Figura 30.	Gráfico de análise de CDPs satisfatórios	50
Figura 31.	Gráfico de análise de CDPs insatisfatórios	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1.	Resultado dos ensaios de arrancamento	43
Tabela 3.2	Corpos de prova satisfatórios	48
Tabela 3.3	Corpos de prova insatisfatórios	48
Tabela 3.4	Análise de CDPs satisfatórios	49
Tabela 3.5	Análise de CDPs insatisfatórios	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CDP	Corpo de prova
CMSP	Companhia do Metropolitano de São Paulo – Metrô SP
EC	Especificação de Componente
EMT	Coordenadoria de Engenharia de Materiais do LGI
END	Ensaio não destrutivo
ETE	Especificação Técnica de Ensaio
ETM	Especificação Técnica de Materiais
GLG	Gerência de Logística
LGI	Departamento de Engenharia de Materiais e Inspeção da GLG
LP	Ensaio de Líquido Penetrante

LISTA DE SIMBOLOS

γ	Tensão superficial do líquido
P	Capilaridade
θ	Ângulo formado pela tangente do raio do líquido no interior do tubo
r	Raio do tubo
R	Raio formado pelo líquido no interior do tubo
δ	Tensão
F	Força aplicada
A₀	Área da seção transversal do corpo inicial do material
A_f	Área da seção transversal do corpo final do material
ϵ	Deformação
L_f	Comprimento final
L₀	Comprimento inicial
E	Módulo de elasticidade (Young)
LR	Limite de resistência
F_{máx}	Carga máxima aplicada no material
S₀	Área da seção inicial do CP
Z	Estricção

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	13
1.2 OBJETIVO DO TRABALHO.....	14
1.3 ESCOPO DO TRABALHO	15
1.4 SISTEMA DE FREIO POR ATRITO DO METROCARRO	16
1.4.1 LOCALIZAÇÃO DO SISTEMA DE FREIO	16
1.4.2 FUNCIONAMENTO	17
1.5 DISCO DE FREIO.....	18
2. REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1 MATERIAL DO DISCO DE FREIO	20
2.2 MATERIAL DO CUBO	20
2.3 MATERIAL DA PISTA	20
2.4 CONCEITOS BÁSICOS DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO	22
2.5 PRINCIPAIS FALHAS ENCONTRADAS NA FUNDIÇÃO DA PISTA COM O CUBO	23
2.6 CONCEITOS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS - END.....	24
2.6.1 ENSAIO NÃO DESTRUTIVO	24
2.6.2 ENSAIO DE ULTRASSOM.....	25
2.6.3 ENSAIO DE LÍQUIDO PENETRANTE.....	27
2.6.4 PRINCIPAIS PROPRIEDADES DOS LÍQUIDOS PENETRANTES.....	29
2.6.4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS	29
2.7 CONCEITO DE ENSAIOS DESTRUTIVOS.....	31
2.7.1 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE O ENSAIO DE TRAÇÃO	32
3 MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 MÉTODO DE INSPEÇÃO POR LÍQUIDO PENETRANTE - PROPOSTA.....	35
3.1.1 ESCOPO.....	35
3.1.2 LÍQUIDO PENETRANTE	35

3.1.3 PROCEDIMENTO DE APLICAÇÃO	35
3.1.4 PREPARAÇÃO DO DISCO PARA ENSAIO.....	36
3.1.5 ENSAIO	36
3.1.6 CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO E ACEITAÇÃO	38
3.1.7 AVALIAÇÃO DO MÉTODO.....	39
3.2 MÉTODO DE ANÁLISE DE ENSAIO DE CISALHAMENTO	41
3.2.1 ESCOPO	41
3.2.2 EQUIPAMENTO	41
3.2.3 FERRAMENTAL	42
3.2.4 AMOSTRAS.....	42
3.2.5 ENSAIO	42
3.2.6 RESULTADOS.....	43
3.3 MÉTODO DE ENSAIO DE TRAÇÃO	45
3.3.1 ESCOPO	45
3.3.2 EQUIPAMENTO	45
3.3.3 FERRAMENTAL	46
3.3.4 CORPOS DE PROVA.....	46
3.3.5 ENSAIO	47
3.3.6 ANÁLISE DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO PELA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL	48
4 CONCLUSÕES	52
REFERÊNCIAS	53
GLOSSÁRIO	55
APÊNDICE A – PROPOSTA DE ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DE ENSAIO - ETE	56

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A Companhia do Metropolitano de São Paulo – METRÔ, foi criada em abril de 1968 e começou a atuar no serviço de transporte de pessoas desde 1972, quando ocorreu a primeira viagem realizada entre as estações Jabaquara e Saúde. Em 1974, começou a operar comercialmente entre o trecho Jabaquara - Vila Mariana.

Atualmente o Metrô de São Paulo possui cinco linhas em operação, totalizando 68,5 quilômetros de rede, 61 estações e 154 trens.

Em 2010, foi inaugurado o primeiro trecho da Linha 4-Amarela, a primeira a ser operada em regime de concessão pelo Consórcio Via Quatro, operando entre Luz e Butantã. Hoje a Linha 4 possui 7 estações, 8,9 quilômetros de extensão e 14 trens.

Em agosto de 2015 teve início a operação comercial do Monotrilho da Linha 15 – Prata, um sistema de transporte inédito no Brasil. A linha opera entre as estações Oratório e Vila Prudente, onde faz integração com a Linha 2 – Verde do Metrô, possuindo 2,3 km de extensão.

A Malha Metroviária da cidade, incluindo a Linha 4 – Amarela, chega a 77,4 quilômetros de extensão e 68 estações.

Hoje a missão da empresa é oferecer transporte público com qualidade, cordialidade, sustentabilidade, respeitando o meio ambiente, visando atender os usuários cada vez maior, atendendo diariamente a cerca de 4,7 milhões de passageiros.

1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é buscar alternativa de inspeção de discos de freio, adquiridos pela CMSP, sem que haja a necessidade de destruição do mesmo para análise da área da junção entre o cubo e pista, visando facilitar e agilizar o processo de inspeção quando do seu recebimento. Atualmente, devido à complexidade geométrica dos discos de freio, esta análise é feita de forma destrutiva, acarretando a perda de material e custos. Esta proposta visa também a elaboração de documento técnico com a finalidade de orientar as inspeções, como proceder nas análises, tanto nas empresas contratadas, como nas dependências da CMSP.

1.3 ESCOPO DO TRABALHO

Estudar a área de junção entre o cubo, fabricado em aço forjado e a pista, fabricada em ferro fundido, através da aplicação de Líquido Penetrante – LP, na região da junção. Para a consolidação do método foram feitos ensaios destrutivos e metalográficos, em um lote de peças adquiridas pela CMSP e que apresentaram problemas de fratura durante o funcionamento em operação comercial.

1.4 SISTEMA DE FREIO POR ATRITO DO METROCARRO

1.4.1 LOCALIZAÇÃO DO SISTEMA DE FREIO

O freio utilizado nos metrocarros são baseados em discos de freio e sapatas de freio, (freio por atrito), estão localizados na extremidade de cada eixo, na parte externa das rodas, figura 1, fixados por parafusos e chapas de travamento. Cada truque é composto por 2 eixos, 4 rodas e 4 discos de freio, figura 2, cada carro possui 2 truques, cada composição possui 6 carros, totalizando 48 discos de freio por trem.

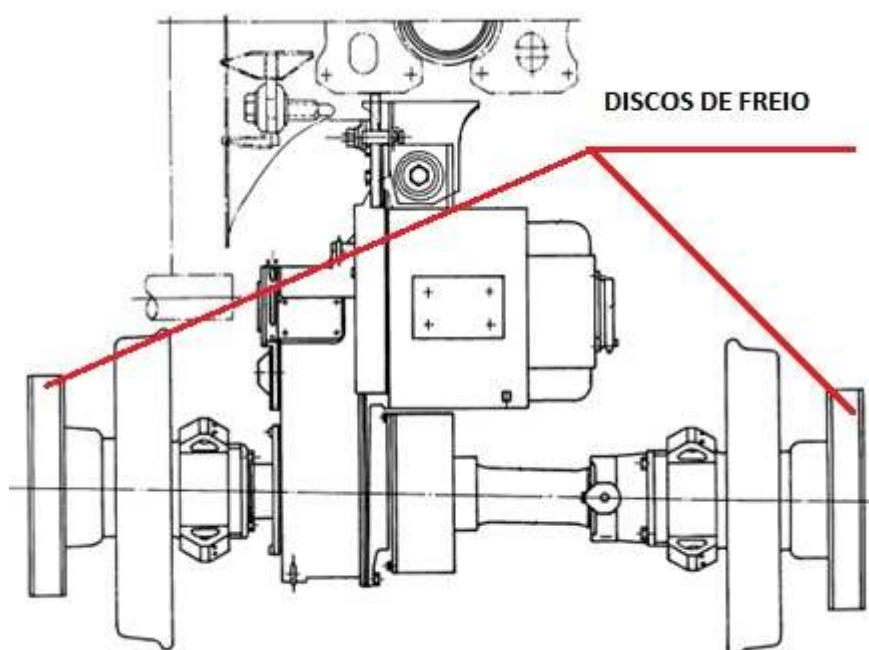


Figura 1 - Montagem típica dos discos de freio

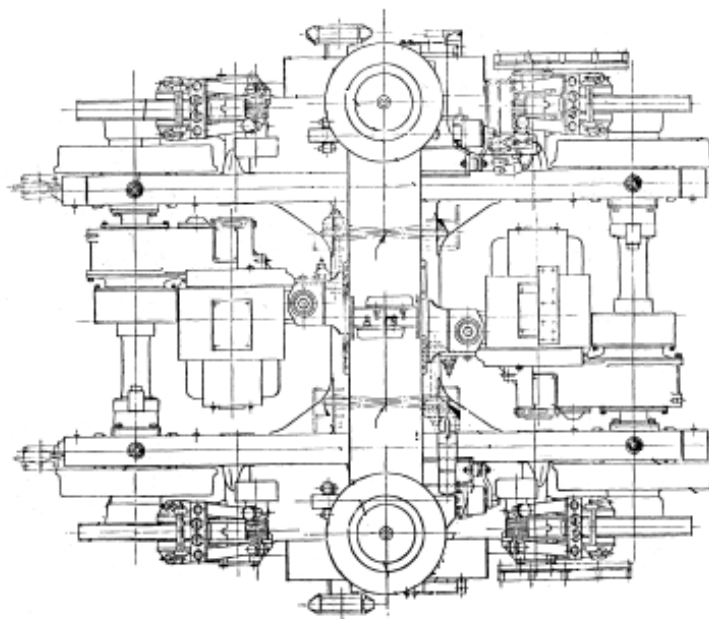


Figura 2 - Truque do metrocarros Alstom

1.4.2 FUNCIONAMENTO

O sistema de frenagem por atrito utilizado nos metrocarros, trabalha com ar comprimido que atua diretamente sobre o cilindro de freio que impõe movimento em alavancas em forma de pinças, articuladas, fixadas por um lado ao cilindro de freio e na outra extremidade estão fixadas as contra sapatas de freio, onde são montadas as sapatas, figura 3.

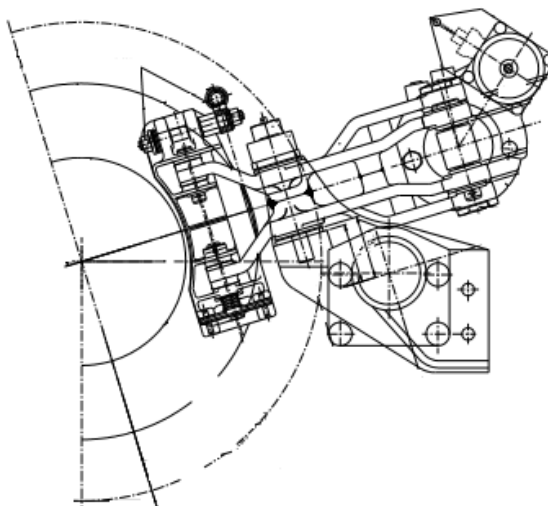


Figura 3 - Unidade de freio vista lateral

O sistema de freio por atrito utilizados nos metrocarros atuam em serviço, emergência e estacionamento, exceto este não opera em conjunto com o freio elétrico.

1.5 DISCO DE FREIO

O disco de freio, objeto deste estudo é composto por uma pista onde ocorre a frenagem, fabricada em ferro fundido cinzento, que proporciona boa resistência ao desgaste e atrito adequados, e de um cubo, utilizado para a fixação na roda. Este cubo é fabricado em aço forjado de boa resistência mecânica capaz de suportar as diversas solicitações durante a operação. Figura 4.



Figura 4 – Disco de freio (Autor)

A união entre Cubo/Pista do disco de freio tem como junção o caldeamento, onde ocorre uma micro fusão entre os materiais e um sistema de ancoragem mecânica, obtido por meio de entalhes com formato de “rabo de andorinha”, ou outro tipo de entalhe, devendo ser igualmente espaçados, a fim de garantir a união de forma homogênea, figura 5.

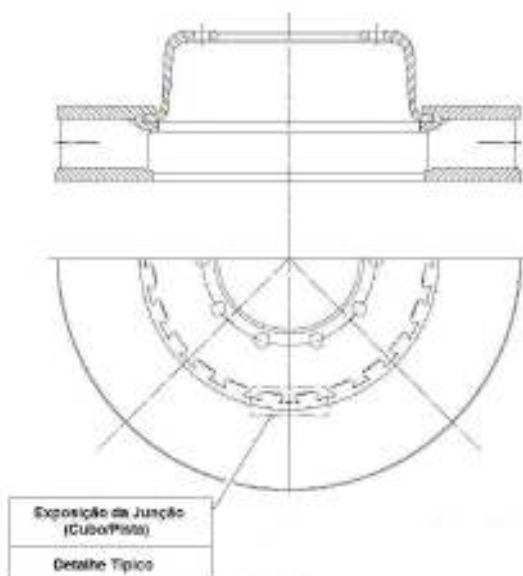


Figura 5 – Detalhe típico da junção “rabo de andorinha”

A união entre o cubo e a pista consiste na fundição da pista sobre a borda do cubo na região do “rabo de andorinha” através de um molde, onde o cubo e a pista estão posicionados concentricamente. É esperado que ocorra a perfeita fusão entre os dois metais, garantindo união entre as duas partes de forma solidária.

A pista de frenagem é composta por duas faces espaçadas por aletas que servem de ventilação para a redução de temperatura, gerada na frenagem durante a operação.

Basicamente o disco de freio possui as seguintes dimensões básicas:

- Diâmetro externo: 610 mm;
- Distância entre faces da pista: 95,2 a 97,4 mm;
- Altura do cubo: 99 mm.

Originalmente os discos de freios foram dimensionados para resistir às seguintes solicitações:

- força radial frenante de 30.000 N aplicada no raio de frenagem;
- força lateral de 10.000 N aplicada no raio frenante;
- força vertical de 60.000 N aplicada radialmente na superfície do diâmetro externo;
- força de compressão de 100.000 N nas pistas;
- temperatura máxima de trabalho estabilizada de 450°C.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 MATERIAL DO DISCO DE FREIO

Os materiais aplicados na fabricação dos discos de freio serão descritos conforme a seguir:

2.2 MATERIAL DO CUBO

O cubo será conformado (forjado) a partir de chapa conforme norma ASTM A36 ou MR 250 – ABNT NBR 7007, com limites de escoamento mínimo de 250 MPa e de resistência entre 400 e 500 MPa.

As características físico-químicas do cubo do disco de freio, deve atender as solicitações dos esforços de frenagem, tais como de compressão, cisalhamento e tração.

2.3 MATERIAL DA PISTA

A pista de frenagem dos discos de freio deverá ser confeccionada em ferro fundido cinzento, com grafita lamelar, de alta resistência a variações e dissipações de temperatura e ao desgaste.

Além das características mencionadas acima, o ferro fundido utilizado para a fabricação da pista dos discos deverá possuir propriedades de amortecimento de ruído e vibrações, boa condutividade térmica, resistência mecânica, resistência ao desgaste.

A pista deve atender ao limite de resistência de 250 a 350 MPa, deve também atender a uma dureza superficial de 170 a 217 HB, a dureza de núcleo de 150 a 217 HB.

Normalmente os materiais utilizados para a confecção da pista de freio são os ferros fundidos da classe FC 200 e FC 250, por apresentar boa condutividade térmica, boa usinabilidade e custo baixo.

Estes tipos de ferros fundidos apresentam o teor de carbono o em torno de 3,5 a 3,6 % com baixo teor de grafita, apresentam microestrutura com matriz perlítica, com mínimo 90% e adição de elementos de liga como cobre e estanho.

A microestrutura da pista deve apresentar grafita lamelar tipo A, com tamanho de 4 a 6. Figura 6.

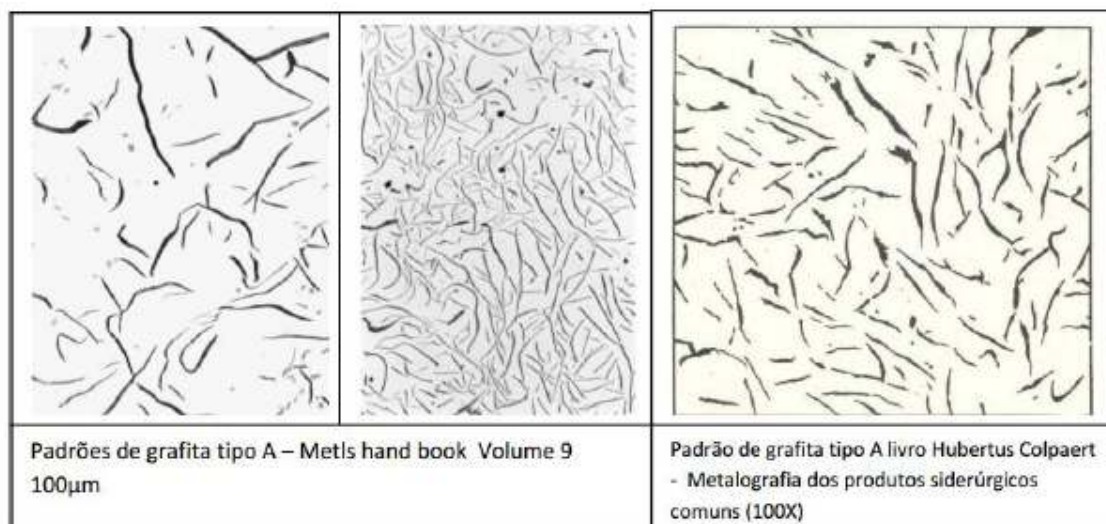


Figura 6 – Padrões de grafita (Colpaert H.)

É importante que as proporções dos elementos de liga sejam mantidas para garantir o mínimo das propriedades mencionadas acima, sem comprometer a funcionalidade do sistema a que foi projetado.

2.4 CONCEITOS BASICOS DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO

O processo de fundição de um determinado metal é basicamente definido pelo aquecimento em forno até atingir a temperatura de fusão e se torne totalmente líquido. Após esta etapa o metal líquido é vazado em um molde contendo uma ou mais cavidades com a geometria próxima a da peça final. Em seguida aguarda-se o resfriamento do metal, dentro do molde que após a solidificação é desmoldado obtendo-se a peça desejada.

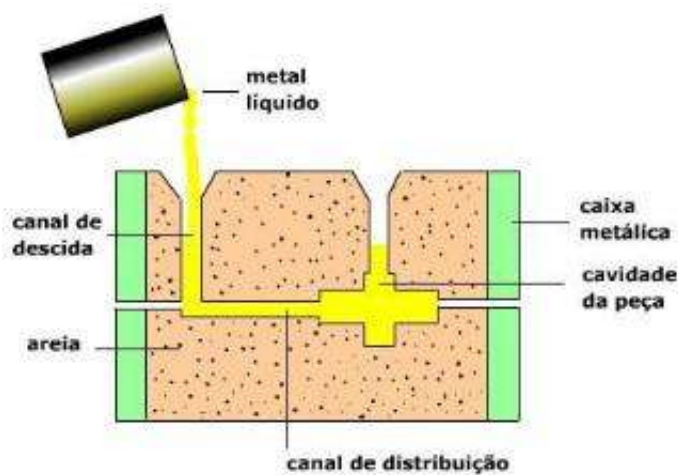


Figura 7 – Esquema básico de processo de fundição

O processo de fundição permite obter, peças com geometria complexas com custos baixos devido a redução de processos complementares e de perdas de materiais. Se torna muito interessante para fabricação de grandes quantidades de peças pela possibilidade da utilização do molde por várias vezes.

O processo de fundição pode ser aplicado a vários tipos de materiais, ferrosos e não ferrosos, porém em aços fundidos podem apresentar micro porosidades e elevadas tensões residuais.

No caso do disco de freio a grande vantagem é a resistência ao desgaste devido ao fato de possuir grafita, que age como lubrificante, e também resistência a corrosão e amortecimento de vibração.

2.5 PRINCIPAIS FALHAS ENCONTRADAS NA FUNDIÇÃO DA PISTA NO CUBO

- Excrescências metálicas – rebarbas, veios metálicos e/ou apêndices ocasionados por falhas de fechamento do molde ou ainda, por quebra, erosão ou deslocamento de macho, etc.;
- Cavidades – pequenas descontinuidades disseminadas superficial e/ou internamente – porosidades, bolhas e pontos de contração de metal, do tipo “rechupe”;
- Soluções de continuidade – apartações, trincas e descontinuidades internas e/ou externas ocasionadas por falhas de “caldeamento” – do tipo “metal frio” ou “junta fria”, decorrentes da utilização de parâmetros inadequados para aquecimento, preenchimento e/ou resfriamento do metal – como estão particularmente sujeitas as regiões de junção entre o cubo e a pista e, ainda, as zonas de partição do molde;
- Defeitos de superfície – “chagas de expansão” – irregularidades superficiais determinadas pelo esmagamento/desprendimento de partes do molde ou pela simples expansão da areia;
- Formas incompletas – grandes vazios internos e/ou externos, resultantes de falhas durante o preenchimento, originadas por insuficiência de metal de enchimento ou por vazamentos no molde;
- Dimensões ou formas incorretas – deformações dimensionais e/ou geométricas devido a contração do metal e/ou modelagem inadequada;
- Inclusões e anomalias estruturais – inclusões de escória e/ou areia desprendida do molde, associadas com bolhas originadas pela formação de gases e/ou outras formações internas anômalas – como por exemplo, trincas e irregularidades macroestruturais;
- Descarbonetação – causada pela perda de carbono na superfície do aço;
- Queima – causada por gases oxidantes que penetram nos limites dos contornos de grãos, formando películas de óxidos.

2.6 CONCEITOS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS – END

2.6.1 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Ensaio Não Destrutivo (END) são técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos sem danificá-los, sendo executadas nas etapas de fabricação, construção, montagem e manutenção. (ABENDI).

Os END podem ser considerados como uma das principais ferramentas utilizadas no controle da qualidade de materiais e produtos, suas aplicações vão nas indústrias de químico, aeroespacial, siderúrgico, naval, eletromecânico e de petróleo/petroquímico, entre outros.

Os métodos utilizados pelos END's proporcionam muitas informações com relação aos defeitos de uma peça ou produto, defeitos internos e externos que não são visíveis por métodos tradicionais.

É necessário para obter resultados satisfatórios que seja feito por pessoas treinadas, com qualificação e certificação, equipamentos específicos e devidamente calibrados, com procedimentos de execução dos ensaios baseados em normas e ou critérios de aplicação previamente definidos.

Das diversas técnicas de Ensaio Não Destrutivo (END), podemos destacar:

- Correntes Parasitas
- Ultrassom
- Partículas Magnéticas
- Estanqueidade
- Líquido Penetrante
- Emissão Acústica
- Radiografia, Radioscopia e Gamagrafia
- Ensaio Visual
- Termografia

2.6.2 ENSAIO DE ULTRASSOM

O Ensaio de Ultrassom, consiste em um método de ensaio não destrutivo (END), que tem como objetivo analisar defeitos e descontinuidades internas em diversos materiais ferrosos ou não.

Estes defeitos internos dos materiais podem ocorrer pelo próprio processo de fabricação, tais como defeitos de laminação, trincas em forjados, uniões soldadas, entre outras causas.

Este ensaio consiste em expor os materiais a ondas acústicas de alta frequência, acima da faixa de audição humana, com geração da onda de forma controlada e direcionada produzida por um transdutor e posterior análise do reflexo do sinal obtido.

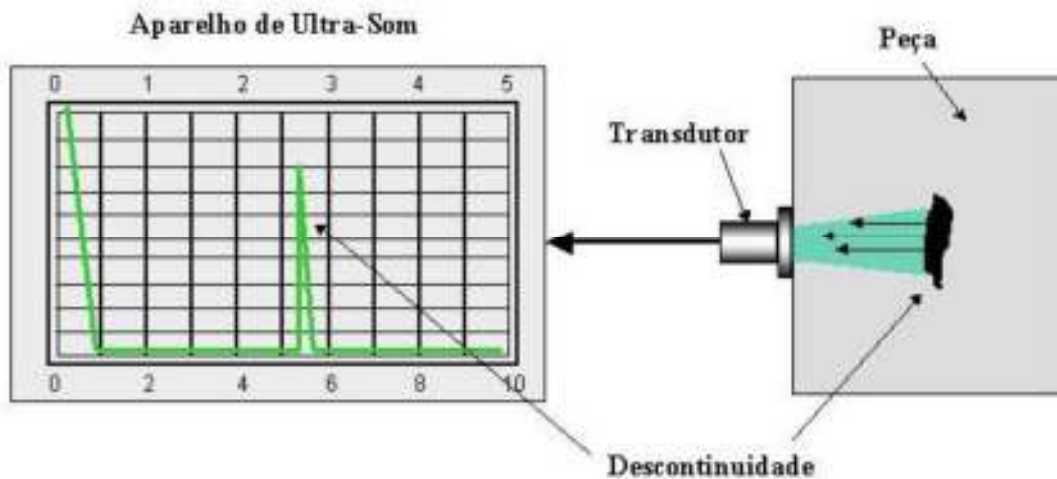


Figura 8 – Representação de ensaio de ultrassom (Andreucci 2002)

No passado, algumas peças produzidas eram submetidas a testes com martelo e observado o som produzido pelo impacto, caso o material testado produzisse um som diferente do característico, evidenciava trincas ou defeitos internos do material.

Como todo método de inspeção, há vantagens e desvantagens em sua aplicação, porém, este método é bem confiável na detecção de pequenos defeitos internos dos materiais.

Como vantagens, podemos destacar:

- Facilidade na detecção de trincas, fissuras, bolhas e etc.;
- Rápida interpretação dos resultados, não tendo a necessidade de outros processos para análise;

- Não há necessidade de revelação, como nos ensaios de radiografia;
- Não há necessidades de proteções contra radiações ionizantes;

Como desvantagem, temos:

- Em materiais muito finos, há dificuldade na obtenção dos resultados;
- A superfície do local da aplicação deverá ser preparada, a fim de não produzir ecos que impeçam a análise dos resultados obtidos;
- Materiais com geometrias complexas;
- Há necessidade de mão-de-obra especializada e treinada para a execução dos ensaios;

No caso, face a geometria complexa do disco de freio e os materiais envolvidos em sua construção, o ensaio de ultrassom torna-se de difícil aplicação e avaliação, sem que haja a necessidade de destruição do disco de freio, para a obtenção de amostras a serem analisadas.

Há também grande dificuldade de análise por se tratar de dois tipos de materiais na sua construção com características físicas bem distintas, pista (ferro fundido) e cubo (aço forjado).

2.6.3 ENSAIO DE LÍQUIDO PENETRANTE

O ensaio por líquidos penetrantes é um método desenvolvido especialmente para a detecção de descontinuidades basicamente superficiais, e que estejam abertas na superfície do material. (Andreucci, Ricardo, ABENDI, 2013).

Este método foi criado no início do século XX, principalmente utilizados na indústria, para a verificação de trincas, poros, mordeduras, vazamentos ou outro tipo de falha superficial, não visíveis, em materiais, ferrosos e não ferrosos, sólidos, que podem trazer problemas durante a utilização do componente.

O método consiste basicamente em fazer penetrar na abertura da descontinuidade um líquido extremamente fluido e com boa capilaridade, que após a sua aplicação remove-se o excesso e aplica-se um revelador que geralmente é em pó.

O revelador tem a propriedade de absorver o líquido penetrante retido nas falhas sendo de fácil visualização.

A grande vantagem deste método é a facilidade de aplicação, sendo bastante prático e bem eficiente em algumas aplicações. A desvantagem é que para materiais porosos e absorventes este método possui baixa eficiência.



Figura 9 – Aplicação do líquido penetrante (Andreucci, Ricardo, ABENDI, 2013)



Figura 10 – Revelação da trinca (Andreucci, Ricardo, ABENDI, 2013)

Neste trabalho, para análise das falhas de caldeamento entre a pista e o cubo dos discos de freio, utilizaremos o método de líquido penetrante, face a facilidade na obtenção dos materiais para aplicação, a facilidade de aplicação do ensaio e a desnecessidade da destruição do disco de freio.

Este procedimento teve pequenas adaptações do método normal definido na norma ABNT NM 334/2012, a fim de atender as necessidades deste estudo.

2.6.4 PRINCIPAIS PROPRIEDADES DOS LÍQUIDOS PENETRANTES

2.6.4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS

O líquido penetrante, recebeu este nome pela facilidade de penetração em aberturas muito finas e deve atender as seguintes características básicas:

- Penetração rápida em aberturas finas;
- Não evaporar rapidamente;
- Espalhar com facilidade
- Ser bem visível, quando aplicado;
- Não ser inflamável com facilidade;

Para que um líquido penetrante possua boas características é necessário que também atenda a algumas propriedades físicas, tais como:

– Viscosidade

A ideia que um líquido menos viscoso é melhor, nem sempre é verdade, pois, tem a ver com a velocidade que o líquido tem de penetrar em aberturas muito finas e não permanecer por muito tempo sobre a superfície da peça e serem retirados facilmente na retirada do excesso.

– Tensão superficial

A tensão superficial é uma força existente na superfície dos líquidos em repouso, esta força existe em decorrência da energia existente entre as moléculas. Na água este fenômeno é bem percebido e pode se observar também o fenômeno da capilaridade.

O fenômeno da capilaridade é bem percebido quando se coloca o líquido em um tubo capilar e verifica-se a o comportamento do líquido em seu interior, observando a formação de uma concavidade ou uma convexidade.

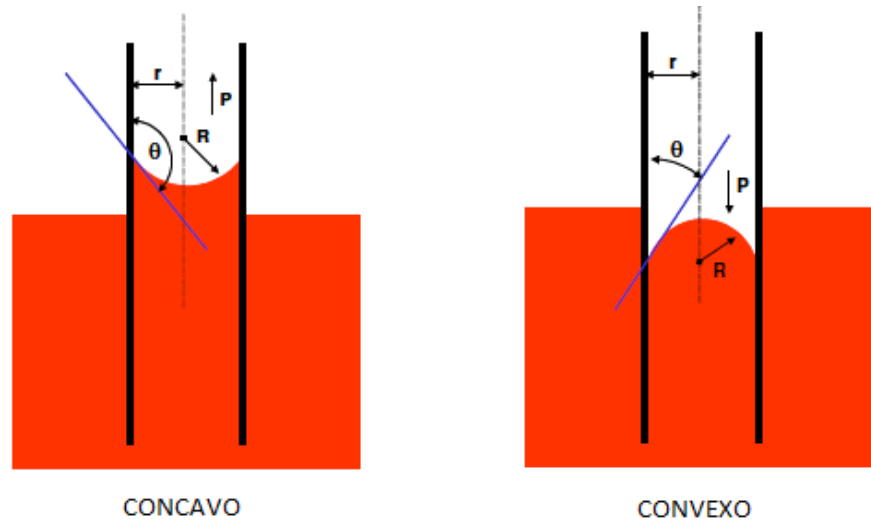


Figura 11 – Capilaridade dos Líquidos (Andreucci 2013)

Estas forças podem ser observadas pelas expressões:

Onde: P é a ação da capilaridade e γ é a tensão superficial do líquido

$$P = \frac{2\gamma}{R} \quad (1)$$

Como $\cos(\theta) = r/R$, podemos escrever a equação da seguinte forma:

$$P = \frac{2\gamma \cos(\theta)}{r} \quad (2)$$

Podemos concluir que a capilaridade (P) aumenta de acordo com a tensão superficial (γ) do líquido e inversamente proporcional ao raio do tubo (r), portanto quanto maior a tensão superficial melhor é a capilaridade do líquido.

– Molhabilidade

É a característica do líquido tem de se espalhar pela superfície, não se formando em porções ou gotas, quanto maior a molhabilidade melhor o líquido penetrante.

2.7 CONCEITOS DE ENSAIOS DESTRUTIVOS

Os ensaios chamados de destrutivos, são assim definidos aqueles tipos e ensaios que causam danos aos materiais ensaiados, podendo inutiliza-los ou danifica-los impedindo-os de serem utilizados.

Os ensaios destrutivos permitem levantamentos numéricos de grandezas em situações extremas de solicitação, que normalmente levam a falha dos materiais, e ajudam a elaboração da análise de resultados comparativos e qualitativos.

Normalmente os ensaios destrutivos são utilizados como complementos aos ensaios não destrutivos (END), com a finalidade da comprovação ou constatação dos resultados obtidos pelo END.

A vantagem do ensaio destrutivo é a leitura direta de grandezas auxiliando em projetos e ou especificações técnicas de materiais.

Dentre os ensaios destrutivos mais aplicados, podemos destacar:

- Ensaio de tração;
- Ensaio de cisalhamento;
- Ensaio de compressão;
- Ensaio de dureza;
- Ensaio de torção;
- Ensaio de fadiga;
- Ensaio de fluência, etc.

Neste trabalho também utilizaremos o ensaio de tração para verificação dos corpos de prova submetidos ao liquido penetrante.

2.7.1 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE O ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração consiste em aplicar uma força em uma única direção e com sentidos contrários no material, fazendo-o alongá-lo até o momento de sua ruptura. Os corpos de prova (CDP), na maioria das vezes são circulares podendo também serem retangulares, neste estudo serão utilizados CDPs na forma retangular. O corpo de prova é fixado pelas suas extremidades em dispositivos de fixação da máquina de tração e submetido a um esforço, aplicando-se uma carga gradativa e registrando o valor da força correspondente a cada alongamento do material. A fim de equalizar as diferenças entre as dimensões dos diferentes corpos de prova, podemos utilizar o conceito abaixo:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

Onde:

- F = Força aplicada
- A₀ = Área da seção transversal do corpo (antes da aplicação da carga)

Podemos também calcular a deformação sofrida pelo CP, em função do alongamento sofrido durante o ensaio.

$$\varepsilon = \frac{(L_f - L_0)}{L_0} \quad (2)$$

- L_f = Comprimento final
- L₀ = Comprimento inicial

Os resultados obtidos através do ensaio de tração são colocados em um gráfico de Tensão x Deformação ($\sigma \times \varepsilon$).

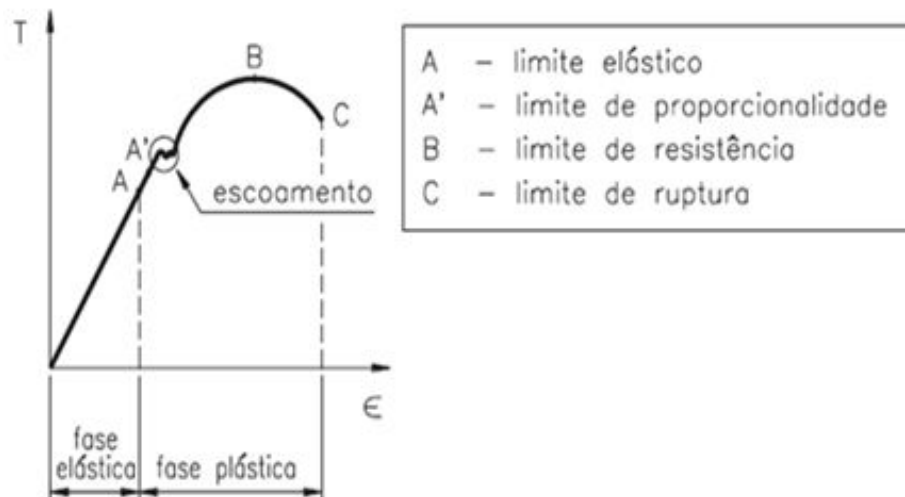


Figura 12 – Gráfico de tensão X deformação

No gráfico de Tensão x Deformação, podemos determinar as fases em que o material se encontra de acordo a tensão aplicada, fase elástica, plástica, escoamento, porém, a que mais interessa neste estudo é o limite de ruptura.

Limite de ruptura:

O limite de ruptura é normalmente inferior ao limite de resistência, uma vez que o material sofre uma redução de sua área, denominado de estrição.

Neste estudo o ponto a ser analisado é a tensão de ruptura na área do caldeamento, pois, é nesta região que ocorre a mistura do ferro fundido da pista com o aço forjado do cubo.

3 MATERIAIS E METODOS

Afim de analisar este estudo foi pesquisado métodos que pudessem auxiliar na determinação de falhas encontradas na área de junção entre o cubo e a pista do disco de freio.

O método que serviu para executar as análises, foi de ensaio por líquido penetrante, pois, permitiu que a análise fosse feita de maneira prática e rápida na obtenção dos resultados.

Este método visa agilizar o processo de inspeção quando da inspeção dos discos de freio, tanto no fornecedor quanto na manutenção preventiva dos metrocarros.

Salientando que já houve um estudo a respeito da análise de falha na região de caldeamento, utilizando o método de ultrassom, mas como mencionado anteriormente, existe grande dificuldade nesta análise, devido a geometria do disco ser bastante complexa, produzindo ruídos e distorções na leitura, sendo necessária a destruição do disco para melhores análises.

Com o objetivo de confirmar os resultados obtidos no ensaio de líquido penetrante, foram retiradas amostras das zonas de caldeamento consideradas como boas e outras amostras consideradas como ruins e submetidas a metalografia, ensaio de tração e flexão.

3.1 METODO DE INSPEÇÃO POR LÍQUIDO PENETRANTE – PROPOSTA

3.1.1 ESCOPO

O método de inspeção da área de caldeamento entre o cubo e a pista do disco de freio por líquido penetrante desenvolvido, foi elaborado com base nos princípios de capilaridade que alguns líquidos possuem, para tanto foi desenvolvida uma mistura capaz de apontar as falhas de estanqueidade, quando existirem, na região da união.

3.1.2 LÍQUIDO PENETRANTE

O líquido desenvolvido, teve como base materiais de fácil obtenção e com baixo custo, trata-se de partes iguais de querosene e solvente incolor a base de hidrocarbonetos alifáticos (aguarrás), adicionado corante que possua solubilidade em óleo.

É óbvio que um penetrante deve ser inerte e não corrosivo com o material a ser ensaiado ou com sua embalagem. Normalmente os produtos oleosos não apresentam perigo, a exceção é quando existem emulsificantes alcalinos, que em contato com água vai se formar uma mistura alcalina. (Andreotti,2013).

3.1.3 PROCEDIMENTO DE APLICAÇÃO

Com o objetivo de avaliar estanqueidade da união, entre o cubo e a pista, desenvolveu-se método de aplicação do líquido penetrante, que consiste em posicionar o disco de freio com o cubo voltado para cima preenchendo completamente a cavidade formada entre o cubo e a pista com o líquido penetrante. Figura 14.

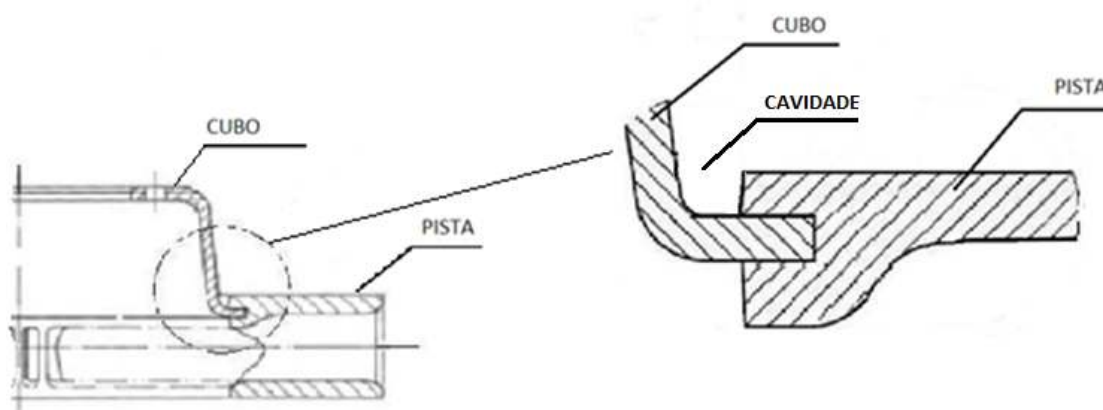


Figura 13 – Detalhe do disco de freio

3.1.4 PREPARAÇÃO DO DISCO PARA O ENSAIO

Deverão ser limpas as faces interna e externa, (região onde ocorre a junção entre o cubo e a pista), do disco a ser ensaiado, com solvente do tipo “thinner” a fim de eliminar resíduos de óleo, graxas, vernizes e qualquer ou tipo de resíduo, borrifando o produto uniforme e abundantemente. Após a aplicação, retirar o excesso com um pano limpo e seco. Figura 14.

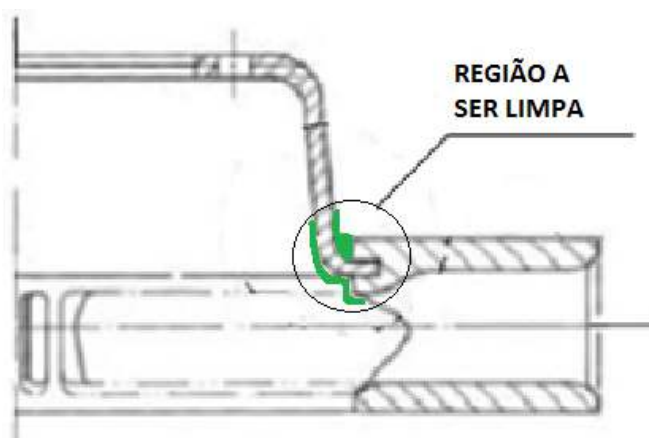


Figura 14 – Limpeza das superfícies

3.1.5 ENSAIO

Apoiar o disco sobre a uma superfície plana e horizontal, mantendo o cubo voltado para cima, preenchendo completamente a cavidade formada entre o cubo e a pista, usando a mistura penetrante. Figura 15 e 16.

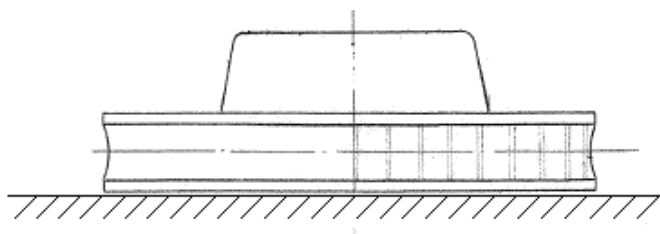


Figura – 15 – Posicionamento do disco

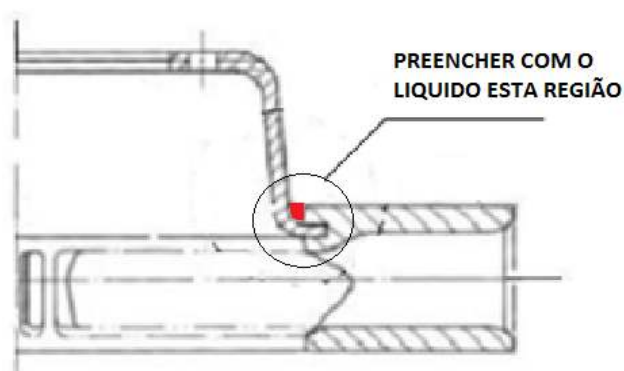


Figura 16 – Posicionamento do disco e local de aplicação

Deixar a peça em repouso por 60 minutos, enquanto a solução penetra por capilaridade. Findado este período, o excesso da solução que permanecer na cavidade deve ser removida com pano seco. Após, girar o disco deixando o cubo voltado para baixo, com o objetivo de verificar eventuais sinais de infiltração da mistura, na face oposta (região interna entre o cubo e a pista). Figura 17



Figura 17 – Região a ser observada

3.1.6 CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO E ACEITAÇÃO

A região avaliada (circunferência interna correspondente a junção entre cubo/pista) deverá apresentar um perímetro livre de vazamento, equivalente a no mínimo 75% do perímetro total da região caldeada.

Não serão admitidos:

- Vazamentos contínuos superiores a 12,5% do perímetro;
- Quadrantes com somatórias de vazamentos superiores a 12,5% do perímetro;

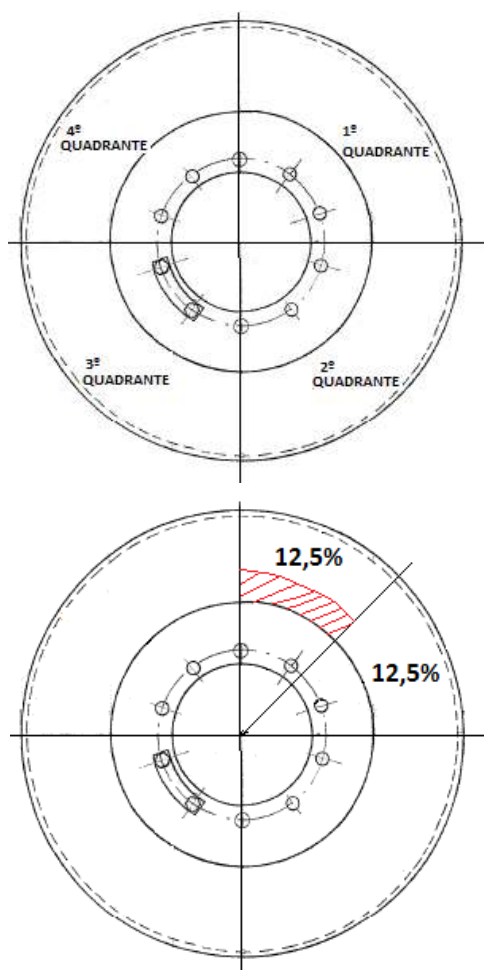


Figura 18 – Quadrantes

NOTA: Quadrante é cada uma das secções imaginárias resultantes da divisão radial da pista (porção fundida do disco de freio), em quatro partes iguais. Figura 18.

3.1.7 AVALIAÇÃO DO MÉTODO

A avaliação do método foi obtida através da verificação por ensaios de tração, metalográfico, arrancamento e flexão, onde foram submetidos os discos a usinagem da parte central da pista vizinhas ao cubo.

Nesta etapa foram submetidos 32 discos de freio, ao método do líquido penetrante, que foram avaliados e submetidos a inspeção, conforme o procedimento descrito anteriormente.

Destes 32 discos de freio, 02 eram do fabricante “original” e 30 de um fornecedor homologado. Os dois discos de freio “originais” não apresentaram vazamentos do líquido penetrante, os 30 discos de freio da empresa homologada, 24 apresentaram “vazamentos” superiores a 12,5% em cada quadrante e 06 apresentaram “vazamentos” inferiores a 12,5%, sendo considerados dentro da especificação.

Os 32 discos de freios ensaiados pelo líquido penetrante, foram submetidos a usinagem da pista, na região da junção, com a finalidade de evidenciar a união do tipo “rabo de andorinha. Figuras 19 e 20.

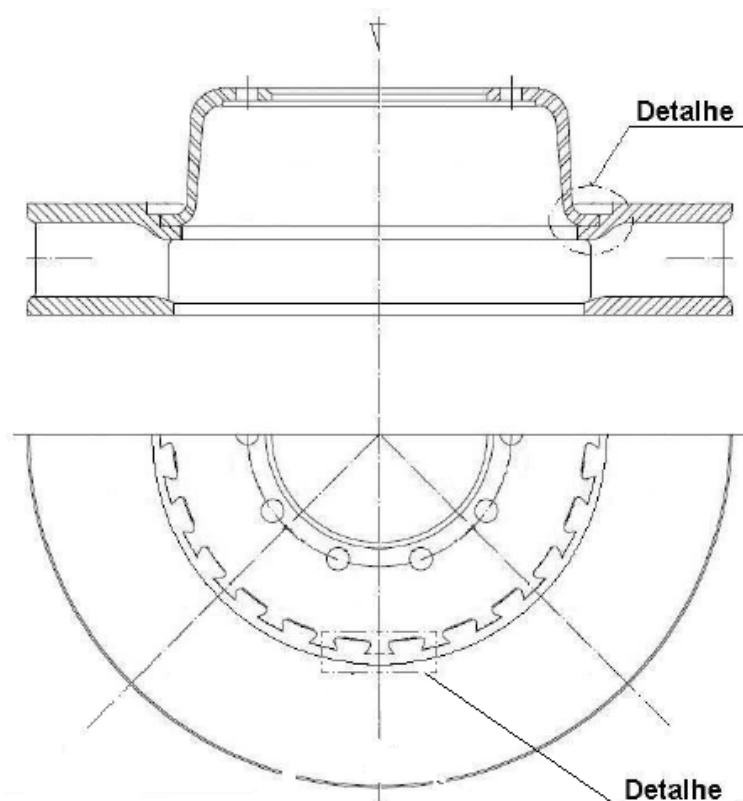


Figura 19 – “Rabo de andorinha”

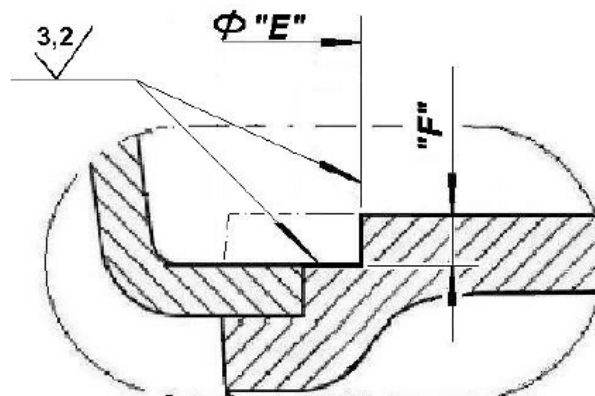


Figura 20 – Detalhe da usinagem

As dimensões “E” e “F” que caracterizam esta usinagem serão definidas, caso a caso, em função da verificação visual da usinagem. Figura 21.



Figura 21 – Usinagem da pista do disco de freio

Como resultado dos ensaios realizados nesta etapa (inspeção visual e líquidos penetrantes), foram identificados os defeitos de fundição existentes na região exposta pela usinagem. Neste contexto, mereceram destaque as imperfeições que comprometeram a região do caldeamento (união entre o cubo e a pista).

3.2 METODO DE ANÁLISE ENSAIO DE CISALHAMENTO

3.2.1 ESCOPO

O ensaio de cisalhamento por “arrancamento”, visa a verificação da força necessária para ocorrer o destacamento da união entre a pista e o cubo do disco de freio estabelecendo critérios de avaliação.

3.2.2 EQUIPAMENTO

O equipamento utilizado para a obtenção deste ensaio foi uma prensa hidráulica modelo PE4T80, com força máxima de 80ton., com manômetro de carga, fabricado pela FAREX. Figura 22.



Figura 22 – Prensa hidráulica

3.2.3 FERRAMENTAL

O ferramental utilizado para a execução do ensaio, foi um anel de aço SAE 1045 com diâmetro de aproximadamente 580 mm, altura de 120 mm e espessura de 15 mm, e um disco em aço SAE 1045 com aproximadamente 250 mm de diâmetro e 50 mm de altura.

3.2.4 AMOSTRAS

Foram retirados 10 discos de freio, que foram submetidos ao ensaio de líquido penetrante e usinados, sendo 5 discos de freio que apresentaram resultados satisfatórios, conforme o método definido anteriormente e 5 discos de freio que apresentaram resultados insatisfatórios.

3.2.5 ENSAIO

Após a caracterização das falhas na união entre o cubo e a pista, pelo líquido penetrante, os discos de freio, previamente usinados na região do “rabo de andorinha”, foram submetidos a aplicação de força axial, com o objetivo de verificar a ocorrência de destacamento na região observada como defeituosa. Figura 23.

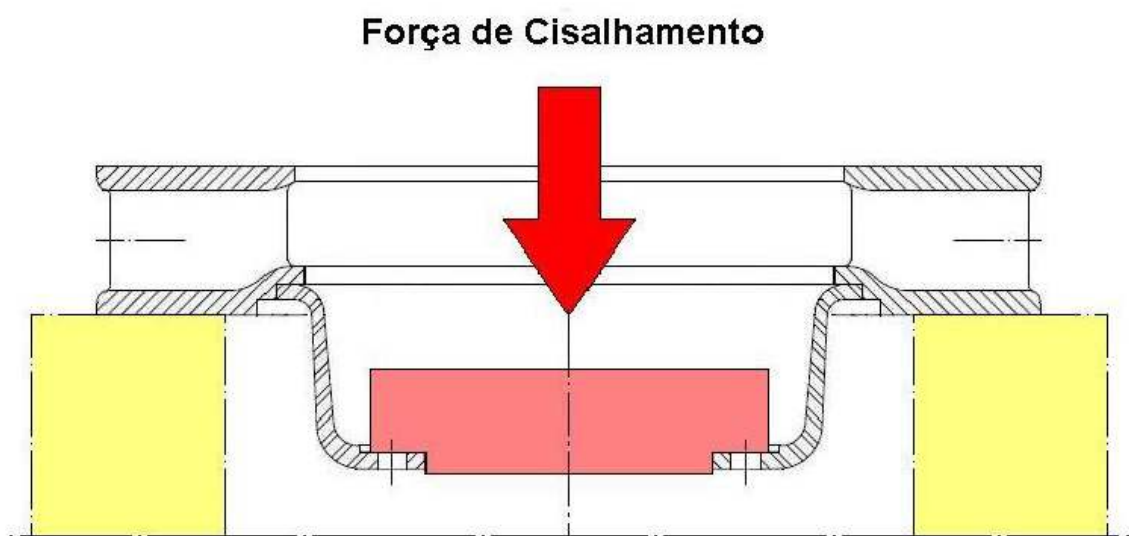


Figura 23 – Aplicação da força

Esta verificação visa consolidar os resultados obtidos na aplicação do líquido penetrante e estabelecer o limite mínimo de cisalhamento na união formada entre a pista e o cubo do disco de freio.

3.2.6 RESULTADOS

Os discos de freio que apresentaram “vazamentos” iguais ou superiores a 40% contínuos na circunferência da união entre pista e cubo, foram observadas forças de arrancamento menor ou igual a 30 ton. Para os discos que apresentaram “vazamentos” inferiores a 40%, a força de arrancamento teve resultados superiores a 50 ton. A tabela 3.1 mostra o resultado do ensaio obtido em 10 amostras, sendo 5 com acima de 40% de “vazamento” e 5 abaixo de 40% de “vazamento”. As Figuras 24 e 25, mostra detalhes de um disco de freio, com características dentro da mencionada que foi submetido a aplicação da força de “arrancamento” e que rompeu próximo aos 30 ton.

AMOSTRA	% DE VAZAMENTO	PRESSÃO (TON.)	CONSIDERAÇÃO
1	45	28 ton.	ruim
2	15	64 ton.	boa
3	45	29 ton.	ruim
4	40	27 ton.	ruim
5	15	62 ton.	boa
6	10	70 ton.	boa
7	5	78 ton.	boa
8	50	23 ton.	ruim
9	60	24 ton.	ruim
10	25	68 ton.	boa

Tabela 3.1 – Resultado dos ensaios de arrancamento



Figura 24 – Detalhes do cisalhamento



Figura 25 – Detalhe do disco de freio após aplicação da força

Para discos de freio que obtiveram resultados satisfatórios no ensaio de líquido penetrante, cujo o “vazamento” do líquido penetrante foi inferior a 25% contínuos na circunferência, a força de destacamento observada foi superior a 50 ton.

3.3 METODO DE ENSAIO TRAÇÃO

3.3.1 ESCOPO

O ensaio de tração tem como objetivo verificar a capacidade dos corpos de prova, fatias do disco de freio, contendo a união cubo e pista suportar uma carga de tração em seu eixo, a fim de validar o ensaio de líquido penetrante.

3.3.2 EQUIPAMENTO

O equipamento utilizado para o ensaio é uma máquina de ensaios universais, capaz de aplicar esforços de tração sobre os corpos de prova, com carga controlada, através de dispositivos que registram a carga e o deslocamento até a fratura ou o destacamento das partes (cubo e pista).

A máquina utilizada foi uma de ensaios universais marca PANANBRA, modelo WOLPERT-AMSLER, modelo 60 TUZ, com capacidade de até 60ton., com registrador de carga.



Figura 26 – Máquina de ensaios universais

3.3.3 FERRAMENTAL

O ferramental utilizado (dispositivo de fixação), consiste em duas peças de aço SAE 1045 com 6(seis) parafusos M10 x 35mm, rosca total com cabeça Allen porcas e arruelas de pressão, para alojamento dos corpos de prova, para fixação na máquina por garras.

O dispositivo foi especialmente desenvolvido para garantir que o eixo de aplicação das forças seja coincidente com o eixo dos corpos de prova.



Figura 27 – Dispositivo do ensaio de tração

3.3.4 CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova são “fatias” paralelas da secção transversal do disco de freio, com espessura de 10 mm, retirados da região do “rabo de andorinha”, contendo a parte intermediária a mesma porção do cubo e da pista.

Os corpos de prova foram retirados tanto na região onde o líquido penetrante não transpassou, como na região onde houve a transposição do líquido penetrante.

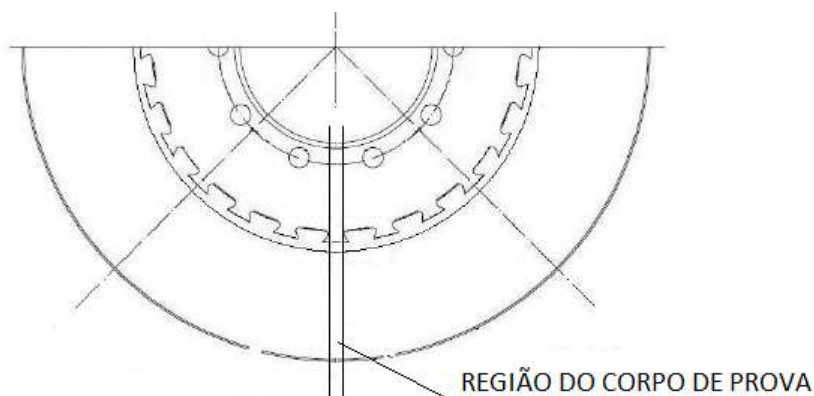


Figura 28 – Área do corpo de prova

3.3.5 ENSAIO

O ensaio consiste na aplicação de uma carga de tração através do dispositivo, objetivando o destacamento do cubo e a pista, na região do caldeamento dos materiais.

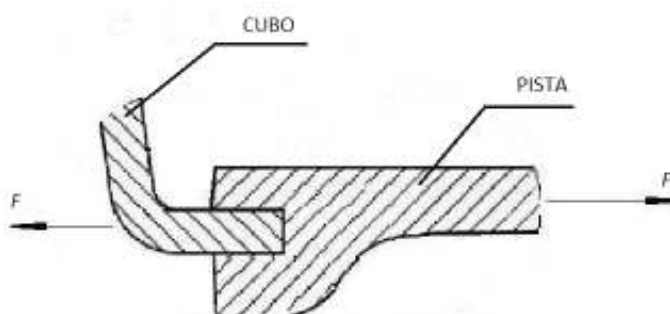


Figura 29 – Ensaio de tração

Não foram consideradas a aplicação da velocidade, pois, não influencia nos resultados esperados.

Foram utilizados 5 corpos de prova de cada região do disco que apresentaram resultados satisfatórios e insatisfatórios no ensaio de líquido penetrante.

É aconselhável retirar corpos de provas extras para ajustes que se fizerem necessários na máquina e dispositivo.

As tabelas abaixo mostram os resultados obtidos nos ensaios de tração dos CDPs:

REGIÃO SATISFATÓRIA	
CDPs	CARGA (ton)
1	3,04
2	3,12
3	2,80
4	2,90
5	3,09

Tabela 3.2 – Corpos de prova satisfatórios

REGIÃO INSATISFATÓRIA	
CDPs	CARGA (ton)
1	0,30
2	0,14
3	0,23
4	0,40
5	0,45

Tabela 3.3 – Corpos de prova insatisfatórios

3.3.6 ANÁLISE DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO PELA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

Os valores de tensão obtidos dos CDPs, na junção entre o cubo em aço e a pista em ferro fundido, foram considerados satisfatórios, como era de se esperar, tendo em vista os resultados apresentados nos ensaios.

O objetivo desta avaliação é verificar o quanto o ensaio de líquido penetrante pode ser válido, dentro da facilidade e simplicidade de execução, aliados ao fato de não ser necessário a destruição do disco de freio no processo de inspeção.

Foi utilizado para a avaliação dos resultados o método gráfico de Weibull, por ser um método de dois parâmetros, mais simplificado para relacionar a probabilidade

acumulada de fraturas e tensão aplicada a um material frágil, do que outras estatísticas que podem produzir resultados diferenciados.

Os logaritmos naturais das tensões são calculados e mostrados na terceira coluna. Estes valores serão representados graficamente ao longo do eixo horizontal do gráfico. Em seguida, a probabilidade acumulada de falha (P_f) é estimada atribuindo a cada ponto de referência.

$$P = \frac{i-0,5}{n} \quad (1)$$

Onde i : ordem da observação e n : número total de observações.

O método mais comum de estimativa destes parâmetros é o de regressão linear, onde transforma-se a função exponencial e uma função linear aplicando-se o logaritmo natural por duas vezes, obtendo-se a equação:

$$Y = \ln\left[\ln\frac{1}{1-P_f}\right] \quad (2)$$

Aplicando-se estas fórmulas nos resultados das amostras retiradas da região satisfatória pelo ensaio de líquido penetrante, foram elaborados os gráficos a seguir conforme tabela 3.4.

i	strenght (Mpa)	X=ln(strength)	Pf=(i-0,5)/n	Y=lnln(1/(1-Pf))
1	27,45	3,312366168	0,10	-2,250367327
2	28,43	3,347444926	0,30	-1,030930433
3	29,81	3,394843908	0,50	-0,366512921
4	30,3	3,411147713	0,70	0,185626759
5	30,59	3,420673158	0,90	0,834032445

Tabela 3.4 - Análise de CDPs satisfatórios

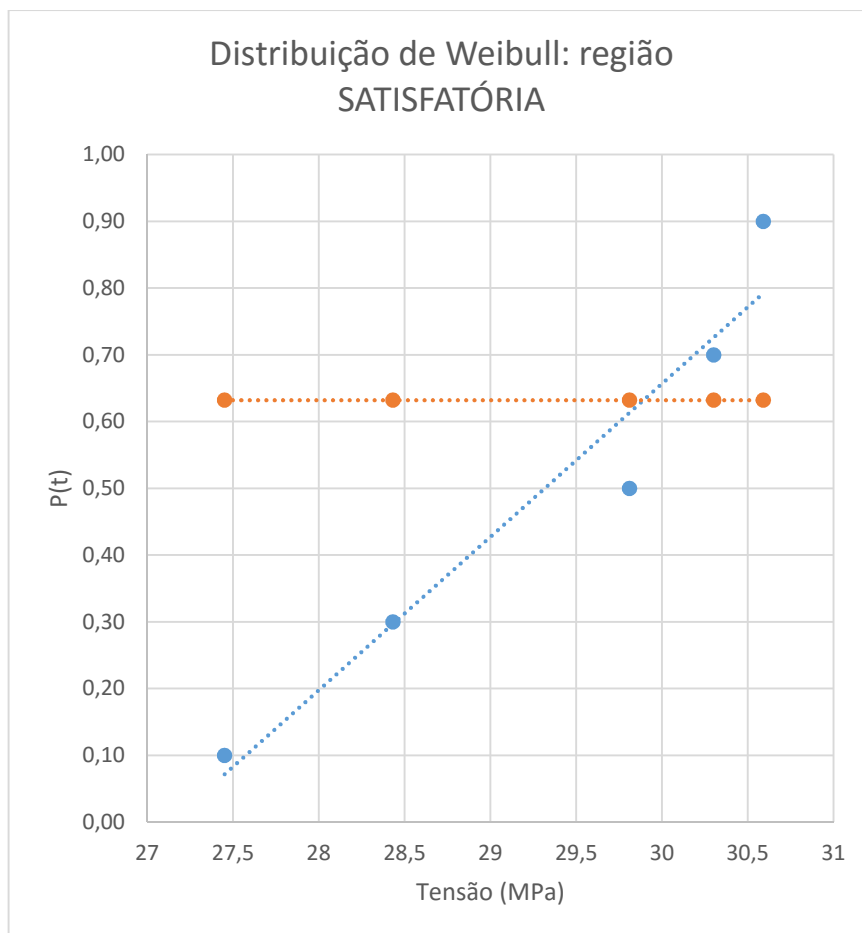


Figura 30 – Gráfico de análise de CDPs satisfatórios

Observando-se a figura 30, referente ao gráfico de análise de CDPs satisfatórios, nota-se que os valores de tensão, estão dentro da faixa de 63,2%, considerado pela análise de Weibull como resultando consistente e uma tensão de 29,89 MPa.

Analogamente a região satisfatória, analisamos a região insatisfatória obtivemos os resultados conforme tabela 4 e gráfico da figura 31, conforme abaixo:

i	strenght (Mpa)	$X=\ln(\text{strength})$	$Pf=(i-0,5)/n$	$Y=\ln\ln(1/(1-Pf))$
1	1,37	0,31481074	0,10	-2,250367327
2	2,25	0,810930216	0,30	-1,030930433
3	2,94	1,078409581	0,50	-0,366512921
4	3,92	1,366091654	0,70	0,185626759
5	4,41	1,483874689	0,90	0,834032445

Tabela 3.5 - Análise de CDPs insatisfatórios

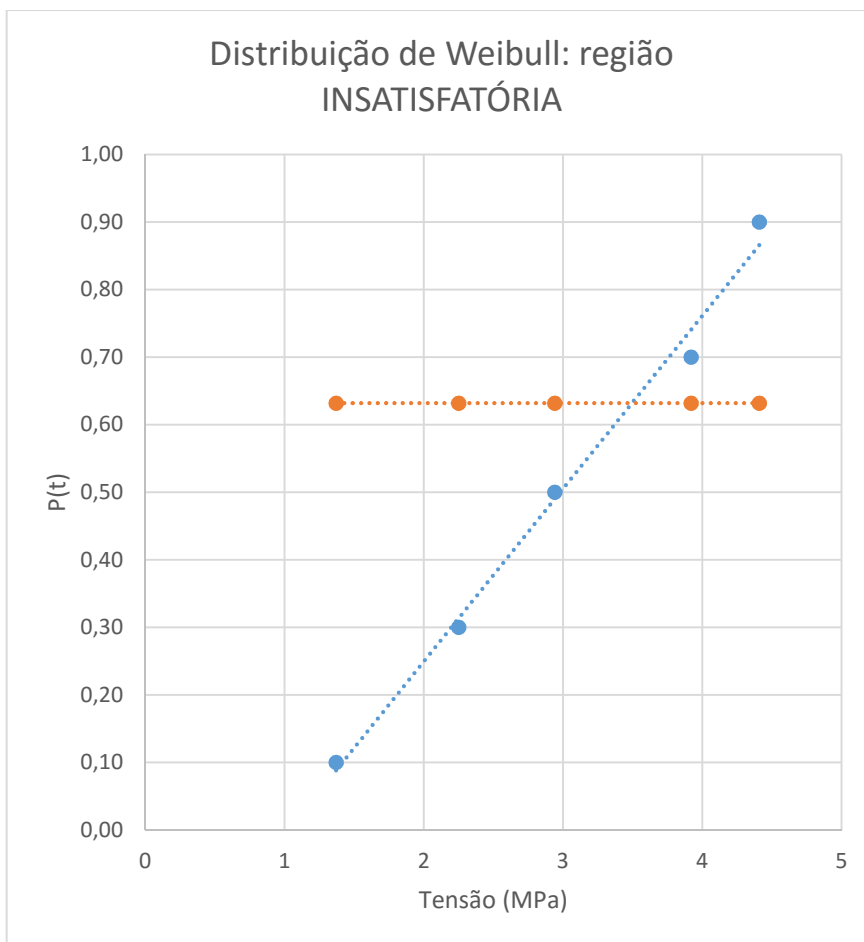


Figura 31 – Gráfico de análise de CDPs insatisfatórios

Da mesma forma observamos que os valores de fratura na região insatisfatória, mostrados na figura 31, referente ao gráfico de análise de CDPs insatisfatórios, observa-se que as tensões ficam em torno de 3,49 MPa, bem inferior em comparação com os corpos de prova da região considerada satisfatória.

Portanto consideramos a análise por distribuição de Weibull consistente para avaliar o método de líquido penetrante, aqui proposto.

4 CONCLUSÃO

Referente ao ensaio de Líquido Penetrante

Conclui-se que baseado nos estudos realizados, o ensaio de líquido penetrante mostrou-se confiável para a análise da região do caldeamento entre o cubo e pista do disco de freio, pois, possibilita identificar de maneira fácil e rápida os defeitos da junção sem que haja a necessidade da destruição do disco durante a inspeção de recebimento ou em fábrica.

Referente ao ensaio de Tração

A aplicação do ensaio de tração contribuiu na obtenção deste estudo pois proporcionou resultados significativos no método de líquido penetrante. Possibilitou a visualização dos defeitos de forma prática. A metodologia se mostrou auxiliando nos processos de inspeção, por indicar os pontos defeituosos.

Referente ao ensaio de Ultrassom

O ensaio de ultrassom desenvolvido, no estudo de junção de ferro fundido e aço carbono em disco de freio metroviário elaborado por Martins e Nucci, 2012, contribuiu para orientar as análises efetuadas com líquido penetrante, embora o ensaio de ultrassom aplicado a análise da junção entre cubo e pista seja um ensaio não destrutivo há necessidade de preparação de corpos de prova para análise, tornando-o demorado na obtenção dos resultados.

Referente ao ensaio de cisalhamento (arrancamento)

A aplicação do ensaio de cisalhamento nos discos de freio usinados na região do “rabo de andorinha”, foi conclusivo para a confirmação dos resultados obtidos no ensaio de líquido penetrante, objeto deste estudo, pois, mostrou-se confiável para avaliação dos discos, facilitando as inspeções dos discos de freio no recebimento, fábrica ou oficinas de manutenção.

REFERÊNCIAS

- ABENDE. **O que são os END**. Disponível em: <http://www.abende.org.br/info_end_oquesao.php>. Acesso em maio 2012.
- ABM. **Curso de Ensaio Não-Destrutivos dos Metais**. São Paulo: ABM, 1966. 278 p.
- ALSTOM. **Manual de Manutenção: Sistema de Frenagem por Atrito - Frota G**. São Paulo: Alstom, 2008.
- ALSTOM. **Manual de Manutenção: Sistema do Truque - Frota Milênio**. São Paulo: Alstom, 2002.
- ANDREUCCI, R. **Ensaio por Líquidos Penetrantes**. São Paulo: ABENDE, 2011. 72 p.
- ANDREUCCI, R. **Aplicação Industrial: Ensaio por Ultra-Som**. São Paulo, SP: ABENDE, 2008. 98 p.
- MATINS C.F., NUCCI P.F. **Estudo da junção de ferro fundido e aço carbono em disco de freio metroferroviário visando qualificação de fabricante e processo com definição de procedimentos e critérios de avaliação**. Dissertação. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007. 193p.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica - Processos de Fabricação e Tratamento – Vol. 2, 2ª Edição**. São Paulo: Editora McGraw-Hill, 1986.
- CMSP. **Especificação de componente EC-9.86.01.33/730-001 rev. 0 - Discos de Freio do Metrocarro: critérios para homologação e fornecimento**. São Paulo: CMSP, 1994. 9p.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. São Paulo: Edgard Blucher, 2008. 652 p.
- METAL-CHECK. **Introdução ao Ensaio de Líquido Penetrante**. São Paulo: Metal-Check do Brasil, disponível em <<http://www.metalchek.com.br/ensaios-naodestrutivos/artigos-tecnicos>>. Acessado em setembro/2015.
- MIGLIORI JR,A,R. **Sobre determinação dos parâmetros de Weibull**. São Carlos: artigo da revista CERAMICA, 1992. 3 p.
- MOLINARI, R **TMF010 -Gerenciamento de Manutenção – RCM**. São Paulo: PECE/EPUSP, 2014, 102 p. Notas de aula da disciplina do curso de pós graduação Tecnologia Metroferroviária do PECE, TMF010 – Gerenciamento de Manutenção.
- NBR NM 334/2012 - Ensaio não destrutivos - líquidos penetrantes – Detecção de descontinuidades**. Rio de Janeiro: ABNT. 2012.30p.

TRUSTUM, K., JAYATILAKA, A. **On Stimating the Weibull Modulus for Brittle Materials**, **J. of Material Science**, vol. 14 pp. 1080, 1979.

GLOSSÁRIO

As definições a seguir relacionadas foram retiradas das referências bibliográficas.

Austenita - solução sólida de Carbono em ferro gama, estável acima de 723°C, com teor de Carbono de até 2%, estrutura Cúbica de Face Centrada, amagnética.

Cementado - característica do aço com baixa concentração de Carbono que, por meio de tratamento termoquímico, recebe esse elemento por difusão em sua periferia. Termo também conhecido como “carbonetado”.

Cementita - carbeto de Ferro (Fe_3C) com concentração 6,67% de carbono, com estrutura ortorrômbica. Dura e frágil. Fase metaestável, que na ausência de elementos de liga (Cromo por exemplo), pode se dissociar em ferrita e grafita.

Crescimento - modo pelo qual os núcleos crescem sob a forma de cristais ou grãos cristalinos, na solidificação.

Dendritas - formações ocorridas na solidificação aços e ferros fundidos (por exemplo) com ramificações secundárias até terciárias dos grãos colunares.

Dispositivo - conjunto de componentes ou funções que possam ter uma atuação ou identidade distinta no produto ou processo.

Eutetoide - temperatura do diagrama de equilíbrio que dá nome à transformação em que uma fase sólida se transforma em outras duas fases sólidas no resfriamento. No aço, austenita se transformando em ferrita e cementita.

Ferrita - fase sólida do diagrama de equilíbrio Fe-C, estável na temperatura ambiente formada no resfriamento da austenita, com baixíssima solubilidade de Carbono (0,002%max), estrutura Cúbica de Corpo Centrado. Macio dúctil. Ferromagnético até 768°C.

Ferro fundido cinzento - tipo de ferro fundido com até 0,8% de **Carbono combinado** (ferrita+cementita) e o restante, 4% no total, é grafita livre na matriz Ferro Carbono. Essa quantidade de grafita livre em formato de flocos, dá uma tonalidade acinzentada na fratura deste material.

Grafita - forma alotrópica do Carbono, fase sólida do diagrama de equilíbrio Fe-C, estável abaixo de 1148°C, principalmente na presença de elementos de liga (Silício por exemplo), constituída de Carbono, em vários formatos (lamelas, glóbulos, flocos, veios, etc), frágil.

Perlita - constituinte formado da mistura lamelar de ferrita mais cementita, resultante do resfriamento lento (em equilíbrio), com difusão do Carbono. Propriedades mecânicas intermediárias entre ferrita e cementita

APÊNDICE A – PROPOSTA DE ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DE ENSAIO – ETE



ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DE ENSAIO

CÓDIGO DO MATERIAL	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	ETE- 0001-00
1TR200619	ENSAIO DE CAPILARIDADE PARA DISCO DE FREIO CALDEADO	FOLHA 1 de 7
<p>1. Objetivo:</p> <p>Determinar metodologia prática para execução de inspeção da área de caldeamento entre cubo e pista e definir os critérios de aprovação de discos de freio.</p> <p>2. Método:</p> <p>Consiste na aplicação de uma mistura penetrante na cavidade existente entre a pista e o cubo, a fim de avaliar a presença de descontinuidades entre o cubo e a pista, indicando desta forma o grau de eficiência do processo de fundição. (figura 1).</p> <div data-bbox="608 808 1077 1093" data-label="Image"> </div> <p style="text-align: center;">Figura 1</p> <p>3. Preparação do disco para o ensaio:</p> <p>Deverão ser limpas a face interna e externa (região onde ocorre a junção entre o cubo e a pista) do disco a ser ensaiado com solvente do tipo "thinner", a fim de eliminar resíduos de óleo, graxas, vernizes e etc., borrifando o produto uniforme e abundantemente. Após a aplicação, retirar o excesso com um pano limpo e seco. (figura 2).</p> <div data-bbox="592 1435 1061 1727" data-label="Image"> </div> <p style="text-align: center;">Figura 2</p>		
EMISSÃO – LGI/EMT	COORDENADOR – LGI/EMT	CH DEPARTAMENTO – LGI/EMT



METRÔ

ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DE ENSAIO

CÓDIGO DO MATERIAL	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	ETE- 0001-00
1TR200619	ENSAIO DE CAPILARIDADE PARA DISCO DE FREIO CALDEADO	FOLHA 2 de 7

4. Ensaio:

- Apoiar o disco sobre a uma superfície plana, mantendo o cubo voltado para cima, preenchendo completamente a cavidade formada entre o cubo e a pista, usando a mistura penetrante. (figura 3, 3A e 3B (foto anexa)).

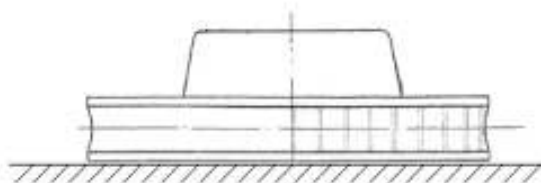


Figura 3

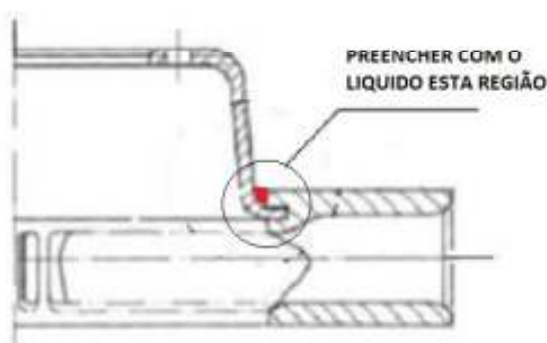


Figura 3A

- Deixar a peça em repouso por 60 minutos, enquanto a solução penetra por capilaridade. Findo este período, a solução que permanecer na cavidade deve ser removida com pano seco. Após, girar o disco, deixando o cubo voltado para baixo, para verificação de eventuais sinais de infiltração da mistura, na face oposta (região interna entre o cubo e a pista). (figura 4 e 4A (foto anexa)).

EMISSÃO - LGIEMT	COORDENADOR - LGIEMT	CH DEPARTAMENTO - LGIEMT
/ /	/ /	/ /



ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DE ENSAIO

CÓDIGO DO MATERIAL	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	ETE- 0001-00
1TR200619	ENSAIO DE CAPILARIDADE PARA DISCO DE FREIO CALDEADO	FOLHA 3 de 7



Figura 4

5. Composição da Mistura penetrante:

Partes iguais de querosene e aguarraz com acréscimo de corante. Para cada litro da mistura, (querosene e aguarraz), adicionar 2,5 gramas de corante solúvel em óleo e solvente, na cor vermelha.

6. Critério de avaliação e aceitação:

- A região avaliada (circunferência interna correspondente a junção entre cubo/pista) deverá apresentar um perímetro livre de vazamento, equivalente a no mínimo 75% do perímetro total da região caldeada;
- Não serão admitidos:
 - Vazamentos contínuos superiores a 12,5% do perímetro;
 - Quadrantes com somatórias de vazamentos superiores a 12,5% do perímetro;

EMISSÃO – LGVEMT	COORDENADOR – LGVEMT	CH DEPARTAMENTO – LGVEMT
/ /	/ /	/ /



ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DE ENSAIO

CÓDIGO DO MATERIAL 1TR200619	DESCRIÇÃO DO MATERIAL ENSAIO DE CAPILARIDADE PARA DISCO DE FREIO CALDEADO	ETE- 0001-00
		FOLHA 4 de 7

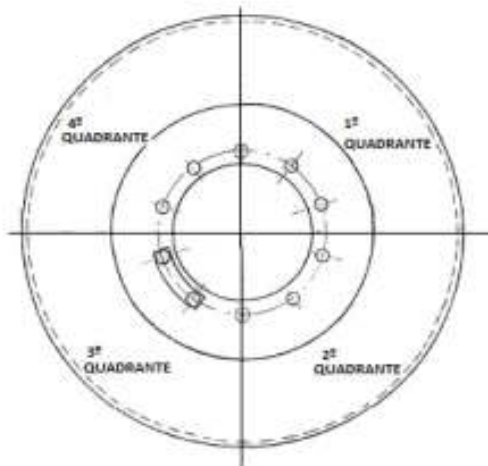


Figura 5

NOTA: Quadrante é cada uma das secções imaginárias resultantes da divisão radial da pista (porção fundida do disco de freio), em quatro partes iguais. (figura 5).

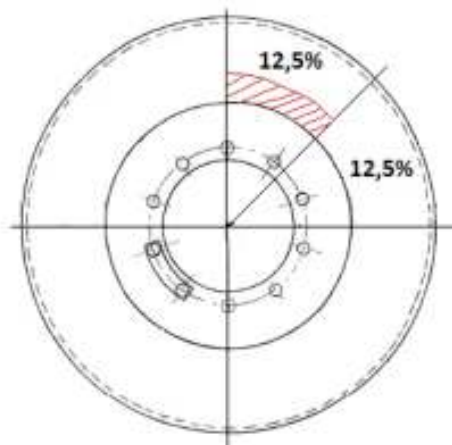


Figura 6

EMISSÃO - LGI/EMT / /	COORDENADOR - LGI/EMT / /	CH DEPARTAMENTO - LGI/EMT / /
------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------

**METRÔ****ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DE ENSAIO**

CÓDIGO DO MATERIAL	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	ETE- 0001-00
1TR200619	ENSAIO DE CAPILARIDADE PARA DISCO DE FREIO CALDEADO	FOLHA 5 de 7
<p>7. Critério de aceitação:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Amostragem pré-fornecimento: <p>Deverão ser apresentadas 20 peças para ensaios e testes, conforme definido neste documento e E.C. 9.86.01.33/730-001 e somente serão admitidas 4 peças fora dos parâmetros aqui estabelecidos.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lotes de fornecimento: <p>Para a inspeção do lote entrega, deverão ser ensaiados, por este processo 100% das peças a serem entregues, sendo que serão rejeitadas todas as peças que não apresentarem condições especificadas do item "5 – critério de avaliação".</p>		
EMISSÃO - LGIEMT / /	COORDENADOR - LGIEMT / /	CH DEPARTAMENTO - LGIEMT / /



ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DE ENSAIO

CÓDIGO DO MATERIAL	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	ETE- 0001-00
1TR200619	ENSAIO DE CAPILARIDADE PARA DISCO DE FREIO CALDEADO	FOLHA 6 de 7

ANEXOS



Figura 3B – cavidade com o líquido penetrante



Figura 4A – região onde deve ser observado o vazamento

EMISSÃO – LGIEMT	COORDENADOR – LGIEMT	CH DEPARTAMENTO – LGIEMT
/ /	/ /	/ /



ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DE ENSAIO

CÓDIGO DO MATERIAL	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	ETE- 0001-00
1TR200619	ENSAIO DE CAPILARIDADE PARA DISCO DE FREIO CALDEADO	FOLHA 7 de 7



Figura 6A – detalhe do vazamento em parte de um quadrante

EMISSÃO – LGIEMT	COORDENADOR – LGIEMT	CH DEPARTAMENTO – LGIEMT
/ /	/ /	/ /