

JOSÉ LUCIANO ESTERQUE

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 flexão.

São Paulo 2016.

JOSÉ LUCIANO ESTERQUE

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 flexão.

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para conclusão do curso de Tecnologia Metro ferroviária.

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha

São Paulo 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA

Esterque, José Luciano

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 Flexão. / J. L. Esterque -- São Paulo, 2016.
43 p.

Monografia (Especialização em Tecnologia Metro-Ferrovária) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.Disco de freio 2.Ensaio de flexão 3.Análise acumulada de falhas - Weibull I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Gilmar Ferreira Batalha, por todo auxílio no desenvolvimento e orientação deste trabalho, agregando conhecimento, experiência e na superação dos desafios.

Aos companheiros de grupo, Casagrande e Alexandre (trabalho completo), aos colegas da Oficina e da Engenharia do Metrô de São Paulo que colaboraram direta ou indiretamente no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é buscar a redução da probabilidade de falhas durante a utilização do componente disco de freio dos trens do Metro de São Paulo e gerar subsídios nos processos de fabricação, homologação e inspeção dentro Gerência de Logística e da Gerência de Manutenção. Este trabalho, também, considera-se complementar ao apresentado neste curso anteriormente, onde se diferencia a abordagem dos ensaios com objetivos finais semelhantes. A região de estudo foi centrada no local de potencial falha, onde, a ocorrência da separação física desta junção, decorrente do processo de fabricação da peça, pode causar graves transtornos durante a movimentação dos trens, responsáveis pelo transporte de passageiros na Cidade de São Paulo. A forma construtiva idealizada nesta peça, chamada de disco de freio, integra a configuração do sistema de freio das rodas ferroviárias que entra em ação quando recebe compressão na pista de rolamento, deste, por um conjunto mecânico de pinças que comprime a pastilha, acionado pneumaticamente. Este componente foi configurado de maneira a transmitir as forças de atrito a roda e, conseqüentemente reduzir a velocidade e finalizar com a parada do trem. Constituída em duas partes: o cubo do disco que representa em sua maior dimensão, o local de união com a roda, fixado através de parafusos e a pista de frenagem que recebe a ação de atrito da pastilha. Esta região que une as partes, chamada de junção entre o cubo de aço com a pista de ferro fundido (MARTINS; NUCCI, 2012), será abordado características, vantagens e desvantagens na execução de ensaios destrutivos de dobramento com solicitação gradativa de aplicação de esforços até o rompimento, serão utilizada amostragem aprovada e reprovada nos métodos não destrutivos já consagrados nos processos de inspeção.

ABSTRACT

The objective of this work is to seek to reduce the probability of failure during use of the brake disc component of the trains of the Metro Sao Paulo and generate subsidies in manufacturing processes, approval and inspection in Logistics Management and Maintenance Management. This work also considered supplementary to that presented earlier in this course, the approach where sets of assays with similar ultimate goals. The study area was centered on the potential failure of place where, the occurrence of physical separation of this junction, due to the part manufacturing process, can cause serious inconvenience for the movement of trains, responsible for passenger transport in the city of São Paulo . A constructively idealized in this piece, brake disc call, part of the brake system configuration railway wheels that comes into play as it gets compression in the raceway, this, by a mechanical set of clamps that compresses the tablet, powered pneumatically . This component is configured to transmit the wheel friction forces and therefore reduce the speed and terminate with the train to stop. Consists of two parts: the disc hub that is in greatest dimension, the place of union with the Wheel, fixed by screws and the braking track receiving the insert friction action. The region joining the parts, called the joint between the steel hub with cast iron track (MARTINS; NUCCI, 2012), will be discussed characteristics, advantages and disadvantages of implementing destructive flexing tests with a gradual request enforcement efforts to the breakup, will be used sampling approved and disapproved in non-destructive methods already included in the inspection processes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Gráfico de Tensão x deformação.	20
Figura 2 – Tensões de resistência ao dobramento (UNIFEI,2015).	21
Figura 3 – Distribuição linear da tensão na linha neutra (Garcia, 2014).....	22
Figura 4 – Método das seções em corte para calculo da força cortante e momento fletor para ensaio de três pontos (Garcia, 2014).	23
Figura 5 – Apoios para ensaio de flexão (UNIFEI, 2015).	25
Figura 6 – Região utilizada nos corpos de prova. (Martins, Nucci, 2012).	26
Figura 7 – Amostra para ensaio de diferentes materiais.	27
Figura 8 – Localização da cavidade existente entre a pista e o cubo.	28
Figura 9 – Peça extraída do disco de freio com variação de posição (Autor, 2015)..	30
Figura 10 – Ferramental para fixação do CDP (Autor, 2015).	30
Figura 11 – Máquina Universal de ensaios (Autor, 2015).	31
Figura 12 – Aspecto da superfície na região da fratura (Autor, 2016).....	34
Figura 13 – Gráfico da distribuição de Weibull com $\alpha = 1$	35
Figura 14 – Gráfico linear da Distribuição de Weibull.....	38
Figura 15 – Gráfico de probabilidade de falha X tensão.	39
Figura 16 – Gráfico da FDP para distribuição normal.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultado da carga de ruptura das amostras.....	33
Tabela 2 – Tabela da distribuição de Weibull.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CDP	Corpo de prova
ETM	Especificação Técnica de Material
ETE	Especificação Técnica de Ensaio
CMSP	Companhia do Metropolitano de São Paulo – Metrô
CO_2	Gás carbônico
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
END	Ensaio de líquido penetrante
FPD	Função probabilidade densidade
MPa	Mega Pascal
T_f	Tonelada força
P_f	Probabilidade acumulada de falha.
N	Número total de amostras.
i	Sequencia de ordenação das amostras.
U_{rf}	Modulo de resiliência à flexão
I_z	Momento de inércia da seção transversal em relação à linha neutra.
S	Área da seção transversal
y	Distancia

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Tensão.
E .	Módulo de elasticidade.
ε	Deformação.
σ_p	Tensão limite de proporcionalidade.
α	Parâmetro de escala
β	Parâmetro de forma
$f(\sigma)$	Função densidade probabilidade
v	Parâmetro de posição.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	13
1.2	OBJETIVO E ESCOPO DO TRABALHO.....	13
2	MATERIAL DISCO DE FREIO.....	14
2.1	COMPONENTES E PROCESSO DE FABRICAÇÃO.....	14
2.1.1	MATERIAL DA PISTA.....	14
2.1.2	MATERIAL DO CUBO.....	14
3	ENSAIOS DE DESEMPENHO DINÂMICO.....	15
4	TIPIFICAÇÃO DOS DEFEITOS DE FABRICAÇÃO.....	16
4.1	DEFEITOS DE FABRICAÇÃO DO CUBO.....	16
4.2	DEFEITOS DE FABRICAÇÃO DA PISTA.....	17
5	RESUMO DA TEORIA.....	19
5.1	DESCRIÇÃO E CONCEITOS PRELIMINARES DE ENSAIOS DESTRUTIVOS.....	19
5.1.1	GRÁFICO TENSÃO X DEFORMAÇÃO.....	20
5.1.2	SOBRE A ESCOLHA DO ENSAIO DESTRUTIVO.....	20
5.1.3	ENSAIO DE FLEXÃO.....	21
6	MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
6.1	MÉTODO DE ENSAIO DE FLEXÃO.....	26
6.1.1	AMOSTRAGEM PARA O ENSAIO.....	26
6.1.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO DE ENSAIO.....	27
7	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	28
7.1	PREMISSAS.....	28
7.2	INSPEÇÃO DO DISCO (ETE 001, CMSP 2013).....	28
7.2.1	ESTANQUEIDADE DA JUNÇÃO.....	28
7.2.2	CRITÉRIOS DE APROVAÇÃO.....	29
7.3	ESCOLHA E CONFECÇÃO DAS AMOSTRAS.....	29
7.4	DIFICULDADES NO PROCESSO.....	29
7.5	CONSTRUÇÃO DO FERRAMENTAL.....	30
8	MÁQUINA DE ENSAIO.....	31
9	REALIZAÇÃO DO ENSAIO.....	32
9.1	CONSIDERAÇÕES.....	32
9.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	32
9.3	RESULTADOS.....	33
9.3.1	REGISTRO DAS CARGAS MÁXIMAS DE ROMPIMENTO.....	33
9.3.2	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DO ENSAIO.....	33
9.3.3	ANÁLISE PELO MÉTODO DE WEIBULL.....	34
9.3.4	ELABORAÇÃO DO GRAFICO DE WEIBULL.....	35
9.3.5	GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL.....	38
10	CONCLUSÕES.....	41
11	BIBLIOGRAFIA.....	42

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A escolha deste componente foi motivada pela importância da sua utilização nos Carros da CMSP no sistema de transporte de passageiros. O disco de freio, consumido na frenagem do trem, é um item de segurança que integra o sistema de tração e frenagem da composição. As equipes de manutenção realiza a instalação e controla sua condição ao longo da vida útil com medições de espessura na superfície de fricção para detecção de desgaste, visualização do estado geral, tais como: fraturas, aparecimento de trincas, fissuras e integridade da fixação à roda ferroviária. Considerando que a disponibilidade do componente deve ocorrer durante seu período de desgaste máximo na utilização, previsto para 4 anos ou 600.000 km rodados. A ocorrência de falha por separação desta junção (detalhado no trabalho completo) causaria uma parada imprevista do trem para reparo mesmo com todos os parâmetros de utilização atendidos e controlados.

1.2 OBJETIVO E ESCOPO DO TRABALHO.

Desenvolver alternativa de métodos de ensaios destrutivos na região de encontro dos materiais, unidos na fundição, de maneira complementar aos outros ensaios abordados no trabalho do grupo (nº1). Este trabalho individual abordará a realização de ensaio de dobramento em três pontos (Bending test) em amostras extraída do disco de freio, utilizando as máquinas de ensaios disponíveis nos laboratórios da CMSP.

2 MATERIAL DISCO DE FREIO.

2.1 COMPONENTES E PROCESSO DE FABRICAÇÃO.

O disco de freio utilizado nos trens da CMSP tem como característica de projeto, o uso de materiais distintos no processo de fabricação onde a pista do disco é aderida ao cubo através de processo fundição. O contato ocorre na extremidade do cubo na superfície composta de 20 a 25 entalhes em formato de “rabo de andorinha”, é onde nasce esta importante região para análise, sob o aspecto de propriedades mecânicas para simulação com aplicação de carga e que podem identificar a qualidade do processo e garantir integridade na união ao longo da vida útil do disco.

2.1.1 MATERIAL DA PISTA

O material da pista utilizado historicamente no projeto original da CMSP é composto de ferro fundido cinzento de alta condutividade térmica, resistência ao desgaste, vibração e ruído, ABNT FC-250, com teor de 3,1-3,5 % carbono de matriz perlítica que deverá ser fundido ao cubo do disco. (ETM – da CMSP, 2015).

2.1.2 MATERIAL DO CUBO.

Componente originado da conformação através de forjamento, derivado de um “blank” de chapa de aço ASTM A36 em formato circular, limite de escoamento mínimo de 250 MPa e limite de resistência entre 400 e 500 MPa. (ETM – da CMSP, 2015).

3 ENSAIOS DE DESEMPENHO DINÂMICO

Os discos de freio depois de inspecionados pelo controle de qualidade da CMSP deverão cumprir uma metodologia para validação do produto final, através de ensaios de desempenho dinâmico, realizados através de lotes de 16 amostras a serem instalados num mesmo trem, submetidos à avaliação de acordo com a rotina proposta. Oito deles serão previamente desgastados por usinagem, reproduzindo a condição de disco já usado. De modo geral os discos de freio deverão estar isentos de quaisquer defeitos que possam causar irregularidades na frenagem. O Proponente para manter a qualificação de fornecimento do disco de freio, não poderá ser reprovado em dois ensaios consecutivos. O trem rodará em local restrito com acompanhamento de representante da Gerência de Manutenção da CMSP.

Os discos de freio que forem aprovados nestes testes serão submetidos a novo teste dinâmico em Operação Comercial de duração aproximada de 90 dias, que corresponde a um intervalo entre as Manutenções Preventivas das composições. É analisada qualquer anormalidade em relação aos critérios de avaliação, como por exemplo: isenção de deformações plásticas, fraturas ou trincas não superficiais, especialmente na região de estudo deste trabalho (interligação cubo/pista) e aletas, dificuldade de instalação em seu local de aplicação, ruído superior a 85 dBA e ou odor excessivo, ambos perceptíveis pelos passageiros no interior dos trens ou em plataformas de estação que possam afetar a saúde ou provocar desconforto aos passageiros, sinais de erosão acentuada ou degradação precoce, sob o risco do Proponente ter que repor os discos de freio defeituosos. (Instrução complementar IC da CMSP, 2015).

4 TIPIFICAÇÃO DOS DEFEITOS DE FABRICAÇÃO

O método do ensaio, os valores dos resultados e a análise do aspecto da superfície, apresentada pelas amostras, poderão indicar defeitos críticos no processo de fabricação dos materiais que compõem o disco de freio, não avaliados nos processos de acompanhamento em fábrica. Esta associação, em tese, poderá aumentar a segurança na aprovação dos lotes na fase de homologação.

4.1 DEFEITOS DE FABRICAÇÃO DO CUBO.

No processo de laminação da chapa (“Blank”):

- Dobras Internas ou “Dupla Laminação” – trata-se de descontinuidades bidimensionais paralelas à superfície da chapa, provenientes de porosidades do lingote ou de reduções excessivas de espessura, cujos vazios ou excessos de massa metálica, conforme o caso, não caldeou durante a laminação (isto é, sofreram apenas um recalque).
- Trincas – decorrentes das operações de redução de espessura em temperaturas inadequadas.
- Falta de uniformidade dimensional – tratam-se das irregularidades dimensionais sistemáticas que excedem o limite máximo de variação preestabelecido.

No Processo de Forjamento:

- Falta de redução – caracteriza-se pela penetração incompleta do metal na cavidade da ferramenta. Isso altera o formato da peça e acontece quando são usados golpes rápidos e leves do martelo.
- Trincas superficiais – causadas por trabalho excessivo na periferia da peça em temperatura baixa, ou por alguma fragilidade a quente.
- Trincas nas rebarbas – causadas pela presença de impurezas nos metais ou porque as rebarbas são pequenas. Elas se iniciam nas rebarbas e podem penetrar na peça durante a operação de rebarbação.
- Trincas internas – originam-se no interior da peça, como consequência de tensões originadas por grandes deformações.
- “Metal Frio”, Junta Fria ou Gotas Frias – são descontinuidades originadas pela dobra de superfícies, sem a ocorrência de “caldeamento”. Elas são causadas por

fluxos anormais de material quente dentro das matrizes, incrustações de rebarbas e/ou colocação inadequada do material na matriz.

- Incrustações de óxidos – causadas pela camada de óxidos que se formam durante o aquecimento. Essas incrustações normalmente se desprendem, mas, ocasionalmente, podem ficar presas nas peças.
- Descarbonetação – caracteriza-se pela perda de carbono na superfície do aço, causada pelo aquecimento do metal.
- Queima – gases oxidantes penetram nos limites dos contornos dos grãos, formando películas de óxidos. Ela é causada pelo aquecimento próximo ao ponto de fusão.

4.2 DEFEITOS DE FABRICAÇÃO DA PISTA.

- 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 descontinidades disseminadas superficial e/ou internamente – porosidades, bolhas e pontos de contração de metal, do tipo “rechupe”.
- Soluções de continuidade – apartações, trincas e descontinidades internas e/ou externas ocasionadas por falhas de “caldeamento” – do tipo “metal frio” ou “junta fria”, decorrentes da utilização de parâmetro(s) inadequado(s) 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, etc.
- 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.

5 RESUMO DA TEORIA

5.1 DESCRIÇÃO E CONCEITOS PRELIMINARES DE ENSAIOS DESTRUTIVOS.

Os ensaios destrutivos são utilizados para determinar as propriedades dos materiais e verificado para medir a capacidade de suportar esforço de uma peça. Ensaio destrutivos são ensaios mecânicos que provocam inutilidade nos materiais ou nos corpos de prova, mesmo que o dano seja pequeno. O ensaio de dureza, em certos casos, produz um pequeno dano. O conhecimento das propriedades dos materiais, muitas vezes, só é possível pela aplicação de ensaios que levam a destruição dos materiais. São usados corpos de prova do mesmo material das peças construídos segundo normas próprias. A medição das grandezas direta nos equipamentos de ensaios são uma das vantagens dos ensaios destrutivos, com simulação de uma ou mais condições de serviço. Os resultados podem alimentar diretamente projetos ou especificações; a correlação entre medidas e propriedades é direta. Os ensaios mecânicos destrutivos podem ser divididos em duas categorias quanto à execução: medindo a reação do material a uma força ou como o material reage a determinadas condições do meio ambiente. Esses ensaios permitem, na maioria das vezes, levantamentos numéricos de grandezas, em condições que levam usualmente à falha dos materiais, gerando distorções, danos ou redução da vida.

Classificação dos ensaios mecânicos destrutivos:

- Tração;
- Compressão;
- Dureza;
- Fratura (choque);
- Flexão (dobramento);
- Torção;
- Fadiga;
- Fluência.

5.1.1 GRÁFICO TENSÃO X DEFORMAÇÃO.

O gráfico da tensão-deformação mostram duas regiões que estão relacionadas ao regime de deformação elástica ou plástica. A primeira é chamada de proporcional em que há relação direta (linear) entre o esforço aplicado e o alongamento verificado no material. A deformação ocasionada pela aplicação de uma carga é temporária. Quando cessa a força, o material retorna ao estado dimensional inicial. Nessa parte da deformação, regime elástico, existe a proporcionalidade formulada por Roberto Hooke em 1678, para representar este trecho linear, pode escrever-se:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

onde E é a constante, representa a relação entre σ e ε , chamado de módulo de elasticidade do material.

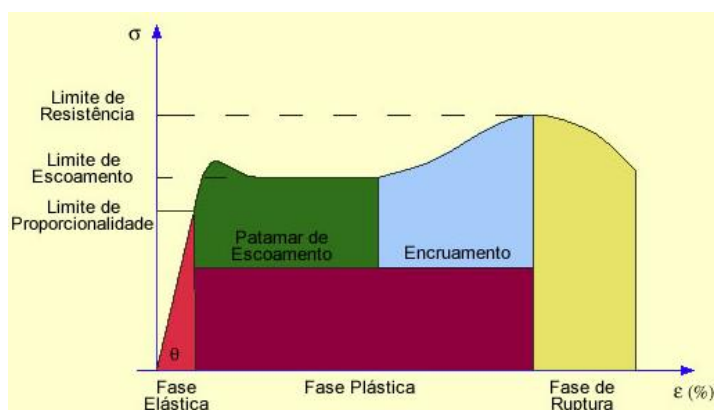


Figura 1 - Gráfico de Tensão x deformação.

5.1.2 SOBRE A ESCOLHA DO ENSAIO DESTRUTIVO.

A presença do ferro fundido envolvido na junção de estudo foi determinante para o direcionamento ao ensaio de flexão, bastante aplicado em materiais de elevada dureza, frágeis, baixa ductilidade que possuem baixo desempenho nas aplicações de outros ensaios mecânicos por não absorver grandes deformações. Este ensaio combina esforços de tração, compressão e cisalhamento sobre a secção transversal. A máxima tensão até a ruptura pode ser descrita como módulo de ruptura ou resistência à flexão.

5.1.3 ENSAIO DE FLEXÃO

O ensaio visa estudar o comportamento de um corpo de prova de geometria padronizada, simulando uma viga engastada ou bi apoiada. É realizado em materiais frágeis e em materiais resistentes, como o ferro fundido, alguns aços, estruturas de concreto, aço ferramenta e outros materiais que em seu uso são submetidos a situações onde o principal esforço é o de flexão. Os tipos são: ensaio de flexão em 3 pontos, onde a barra de teste é bi apoiada nas extremidades e carga aplicada na região central do CDP onde a distancia entre os apoios cumpre padrões estabelecidos; método de flexão de quatro pontos onde a barra é apoiada nas extremidades e a carga é aplicada em dois pontos distantes igualmente do centro da barra, método de engaste onde a carga é aplicada na extremidade livre da barra. Considerando a aplicação de forças numa peça de um determinado material, agindo perpendicularmente ao eixo, em um corpo ou viga apoiado, tanto em um lado quanto nos dois, conforme a figura 2 nota-se que a da esquerda mostra um corpo apoiado em suas duas extremidades e a da direita mostra um corpo preso de um lado, com a extremidade oposta livre.

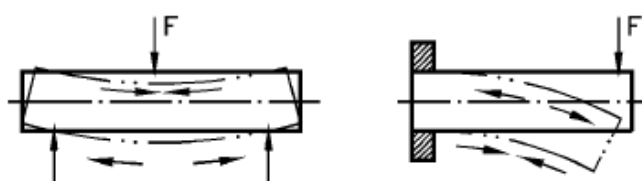


Figura 2 – Tensões de resistência ao dobramento (UNIFEI,2015).

Admitem-se hipóteses de ocorrências no ensaio de flexão para simplificação desde complicado estado de tensões geradas segundo Garcia/Jaime/Carlos, 2014:

- Durante a flexão seções transversais do corpo de prova não sofrem tensão normal ($\sigma = 0$)

- Os esforços que o ensaio de flexão gera são normais e tangenciais na seção transversal do corpo de prova, provocando um estado de tensões no seu interior.
- Corpo de prova retilíneo;
- Existe uma superfície neutra passando pelo eixo longitudinal que não sofre tensão normal ($\sigma = 0$) e o encontro da superfície neutra com qualquer seção transversal do corpo de prova gera uma linha chamada de linha neutra (LN), conforme figura 2.
- Na seção transversal a distribuição da tensão normal é linear com máxima tração na superfície interna (inferior) e máxima compressão na superfície interna (superior).
- Corpo de prova retilíneo

5.1.3.1 LINHA NEUTRA

A força aplicada contra uma região dos corpos, devido à compressão, enquanto outra região se alonga, devido à tração. Na região central, mantém-se uma linha que não altera a dimensão, chamada de linha neutra. (NASHI, 1977).

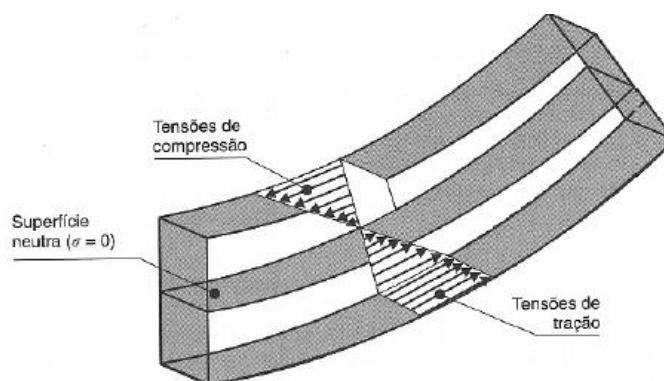


Figura 3 – Distribuição linear da tensão na linha neutra (Garcia, 2014)

Quando esta força provoca somente uma deformação elástica no material, dizemos que se trata de um esforço de flexão. Quando produz uma deformação plástica, temos um esforço de dobramento. Isso quer dizer que, no fundo, flexão e dobramento são etapas diferentes da aplicação de um mesmo esforço, sendo a flexão associada à fase elástica e o dobramento à fase plástica.

5.1.3.2 ESFORÇOS ATUANTES NO ENSAIO

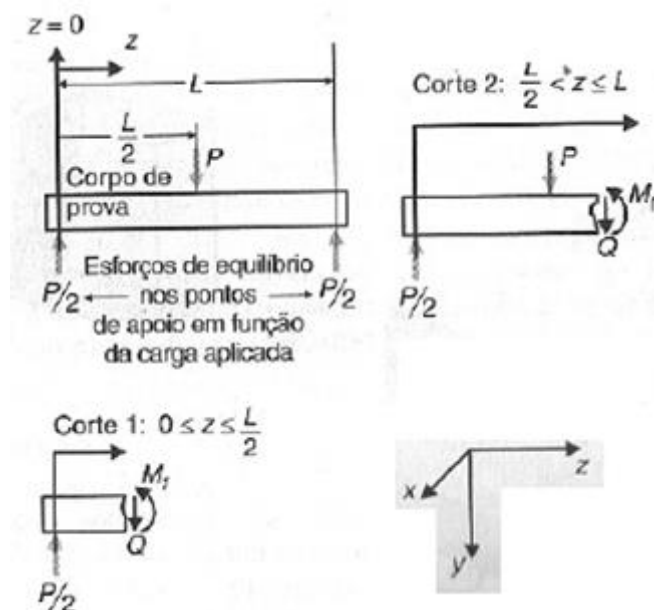


Figura 4 – Método das seções em corte para cálculo da força cortante e momento fletor para ensaio de três pontos (Garcia, 2014).

Na realização do ensaio de flexão no corpo de prova, resulta no aparecimento de esforços atuantes no processo até a ruptura. O efeito da aplicação da carga gera no interior do material de maneira variável, uma força cortante (Q), ou de cisalhamento, e um momento fletor (M_f) ao longo do eixo longitudinal. A força cortante provoca o equilíbrio no balanceamento da carga aplicada e entre os apoios ou engaste e o momento fletor corresponde ao giro da seção transversal e pode ser calculada pelo método das seções.

5.1.3.2.1 MODULO DE RUPTURA

Corresponde ao maior valor da tensão de compressão ou tração no corpo de prova no ensaio de flexão

$$\sigma = \frac{M_f}{I_z} \cdot y \quad (2)$$

$$MOR = \frac{M_f \text{ máx}}{I_z} \quad (3)$$

5.1.3.2.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE.

Para determinação do módulo de elasticidade conforme a medida de flecha e para cada carga aplicada deve-se usar a equação geral, conforme o tipo de ensaio. Nos materiais dúcteis, normalmente ocorre uma deformação contínua sem propriedade de interesse prático.

5.1.3.2.3 MÓDULO DE RESILIENCIA.

No módulo de resiliência tem relação direta com as dimensões do CDP e a tensão aplicada, porém, sempre no regime elástico e é dado pela fórmula, a seguir.

$$U_{rf} = \frac{\sigma^2 . I_z}{6 . E . y^{-2} . S} \quad (4)$$

5.1.3.3 NORMA RELATIVA AO ENSAIO DE FLEXÃO.

Os métodos do ensaio de flexão utilizados na determinação das propriedades, como módulo de elasticidade em flexão (MOE) e o módulo de resistência à ruptura por flexão (MOR) de tiras, chapas, vigas engastadas e três e quatro pontos estão descritas na norma ASTM E855:1990. Apesar das propriedades serem as mesmas, corresponde a valores diferentes aos obtidos nos ensaios e tração e compressão.

Existem variações nos parâmetros do corpo de prova (direção de laminação, dimensões, microestrutura, tensões residuais, tratamentos térmicos, condições de operação e ambientais) (Garcia, 2014).

5.1.3.4 MONTAGEM DO CORPO DE PROVA

Para realização do ensaio de flexão é utilizada a máquina universal de ensaios. São dois roletes, com diâmetros determinados em função do corpo de prova, que funcionam como apoios, afastados entre si a uma distância preestabelecida; um cutelo semicilíndrico, ajustado à parte superior da máquina de ensaios.

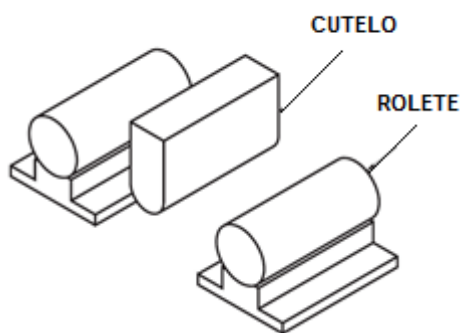


Figura 5 – Apoios para ensaio de flexão (UNIFEI, 2015).

6 MATERIAIS E MÉTODOS.

Para realização deste estudo de ensaio de flexão, se faz necessária, além da análise teórica, a realização de ensaios de laboratório para aferir modelos matemáticos e obter parâmetros para serem usados em tais modelos. Para aferir os modelos teóricos de comportamento das amostras foram realizados ensaios de flexão na modalidade de 3 pontos, modelo guiado, feito por meio de rolos de apoio, onde se aplica uma carga crescente numa barra removida de disco de freio, que já haviam sido submetidas aos ensaios de END, estocada no almoxarifado. As amostras do corpo de prova na região de estudo e os dispositivos de teste, foram preparados nas Oficinas da CMSP. O programa de ensaios foi desenvolvido no Laboratório de inspeção de materiais da Gerência de Logística da CMSP.

6.1 MÉTODO DE ENSAIO DE FLEXÃO

6.1.1 AMOSTRAGEM PARA O ENSAIO

As amostras do material para teste foram retiradas na Junção Cubo/Pista – região de “engastamento” compreendida na área de contato que circunda toda a região dos entalhes ou “rabo de andorinha”, na união da pista de frenagem ao cubo. Como já existe recomendação de incorporar soluções construtivas que proporcionem o aumento da área de contato deste engastamento, melhorando a ancoragem das partes, será proposto neste trabalho, como estudo de melhorias no processo construtivo, conforme especificação de material da CMSP.

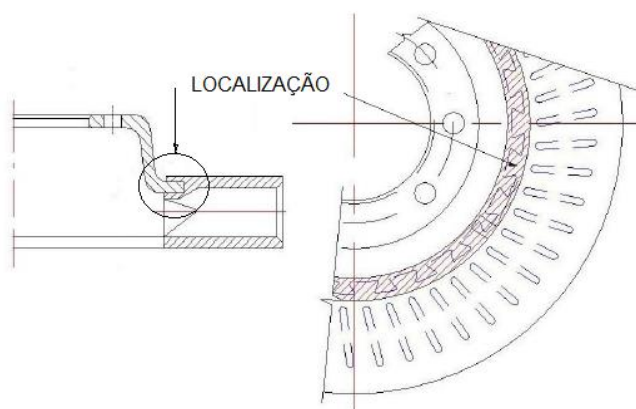


Figura 6 – Região utilizada nos corpos de prova. (Martins, Nucci, 2012).

6.1.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO DE ENSAIO

As propriedades das amostras são obtidas através de ensaio de composição uniforme, ou seja, mesmo material. Neste trabalho de maneira experimental, foi considerado o CDP composto de 2 materiais distintos, unidos no processo de fabricação do disco de freio, na qual caberá uma interpretação dos resultados.

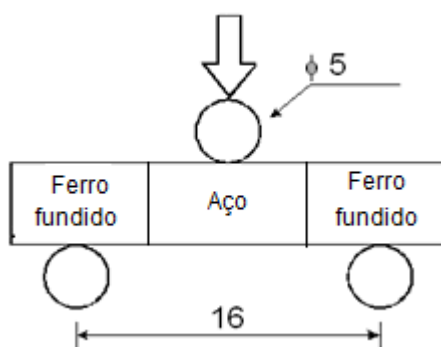


Figura 7 – Amostra para ensaio de diferentes materiais.

Na junção de estudo será verificada a capacidade de deformação dos materiais até o rompimento e a detecção de defeitos de compactidade e metalúrgicos e para obter valores comparativos através de um dobramento guiado.

Devido à pequena espessura das medidas dos corpos de prova na junção, o tipo de dobramento adotado foi o transversal de face.

7 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.

7.1 PREMISSAS.

A caracterização e indicação de escolha das amostras foram determinadas pelos resultados dos ensaios END, no processo de inspeção da qualidade da fundição na face frontal da junção, entre o cubo e a pista na CMSP e, em relação às zonas de “caldeamento” e de não “caldeamento”.

7.2 INSPEÇÃO DO DISCO (ETE 001, CMSP 2013).

7.2.1 ESTANQUEIDADE DA JUNÇÃO.

O disco de freio será inspecionado quanto à estanqueidade da junção, após a limpeza da face interna e externa da junção, apoiado numa superfície plana, mantendo o cubo voltado para cima e preenchendo completamente a cavidade formada entre o cubo e a pista. Aplica-se 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 8).

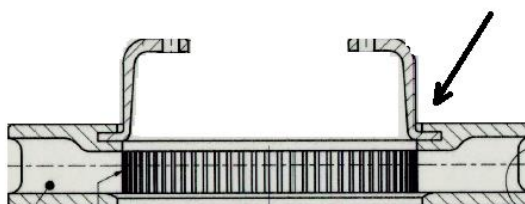


Figura 8 – Localização da cavidade existente entre a pista e o cubo.

Deve-se aguardar 1 hora após a realização do ensaio para penetração por capilaridade da mistura penetrante. Após este tempo, o excesso da solução que permaneceu na cavidade deve ser removida. Depois o disco deve ser virado, deixando o cubo voltado para baixo para verificação de eventuais sinais de infiltração na face oposta da mistura (região interna entre o cubo e a pista).

7.2.2 CRITÉRIOS DE APROVAÇÃO

A circunferência avaliada que corresponde à região interna da junção entre cubo e a pista poderão transpassar material penetrante entre as superfícies em 25% no máximo e, a região restante caldeada deverá estar seca. Outro critério de reprovação será quando apresentar vazamentos contínuos acima de 12,5% do perímetro.

7.3 ESCOLHA E CONFECÇÃO DAS AMOSTRAS.

As oito amostras foram retiradas de um disco de freio ensaiado com END, composto por dois trechos de estudo, a zona com junção aprovada onde não houve passagem de líquido e a outra reprovada onde houve transferência por capilaridade do líquido penetrante. Foi estabelecida, então, por este princípio, a separação para análise do ensaio de flexão. Serão quatro amostras de cada região retiradas do disco de freio. A remoção ocorreu seccionando transversalmente o contorno dos encaixes do “rabo de andorinha” (figura 6).

7.4 DIFICULDADES NO PROCESSO.

Na preparação do CPD houve dificuldades na fabricação, em relação ao inicialmente previsto neste trabalho, a saber:

- a) Devido à falta de indicação no posicionamento do “rabo de andorinha”, o desenho de construção do disco de freio foi analisado para conhecimento de referências, pois seriam descartadas amostras fora do melhor local para o ensaio do material da junção, identificada na figura 8, sendo resolvido.
- b) Inicialmente foi previsto dimensões de 8 mm x 8 mm x 24 mm para o CPD bloco retangular, porém, durante a tentativa de usinagem para correção dimensional, a junção desprende-se, invalidando o CPD. Para não comprometer o resultado ou danificar o CDP, foi proposto, então, a utilização das amostras para o ensaio, sem acabamento.

- c) O local retirado da junção foi definido que seria o volume máximo de aço forjado unido ao CDP.

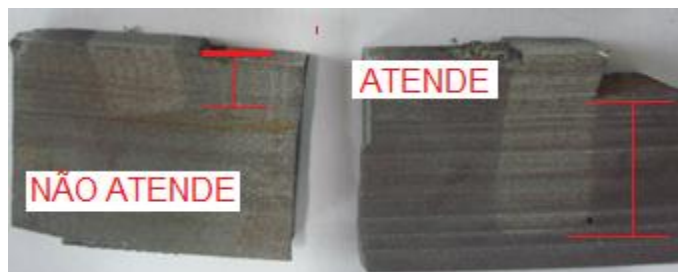


Figura 9 – Peça extraída do disco de freio com variação de posição (Autor, 2015).

7.5 CONSTRUÇÃO DO FERRAMENTAL

Para possibilitar a execução dos ensaios foi necessária a construção de um acessório de configuração específica devido às dimensões do corpo de prova. Fabricado em aço SAE 1020 e composto de duas guias verticais para evitar movimentações das bases. O material dos roletes e cutelo são agulhas de rolamentos de diâmetro de 5 mm. retificados e, nas bases de sustentação foram feitos entalhes para evitar movimentação indesejada.

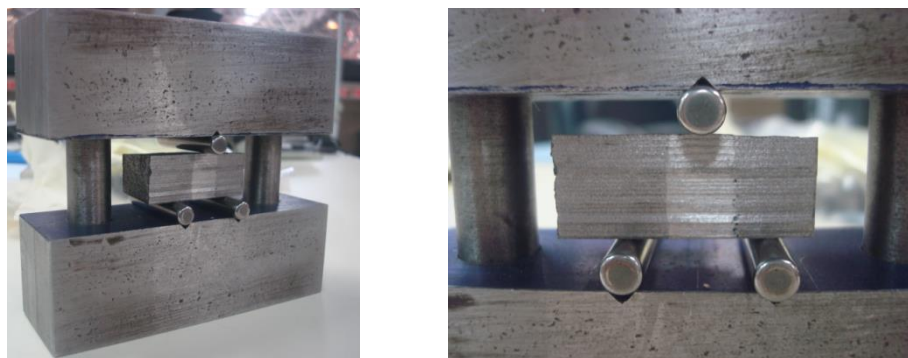


Figura 10 – Ferramental para fixação do CDP (Autor, 2015).

8 MÁQUINA DE ENSAIO.

O ensaio foi realizado na Máquina Universal de Ensaio, sistema WOLPERT-AMSLER, modelo 60 TUZ, fabricante Panambra Industrial e Técnica S.A. Carga máxima de 600 kN e acionamento do cabeçote inferior motorizado. Acoplado a uma unidade de comando e de medição de forças, eletrônica, modelo GNE, através de células de carga. Precisão de medição +/- 5% da medição de uso ou +/- 1% da leitura. Conforme norma DIN 51221, classe 1. (Catálogo Panambra 1998).



Figura 11 – Máquina Universal de ensaios (Autor, 2015).

9 REALIZAÇÃO DO ENSAIO.

9.1 CONSIDERAÇÕES.

A realização do ensaio de dobramento está relacionada ao principal esforço de flexão em materiais frágeis e, associada à pequena dimensão das amostras. O rompimento ocorre sempre na junção e, mesmo sendo aplicado carregamento gradualmente, a flecha torna-se inexistente. Os parâmetros medidos podem ser usados para caracterizar a resistência do material como num ensaio de tração. Sendo assim, para determinar a tensão de flexão, utilizaremos a carga que provocou a fratura do CP. Não foi localizada uma norma específica que atendesse as condições deste ensaio, mas a norma NBR 6153 - 1988 - Produtos metálicos - Ensaio de dobramento semi guiado foi utilizada como referência.

9.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.

Foram executados 8 ensaios de dobramento, provenientes da mesma amostra de disco de freio, em 2 lotes de CP, dimensões médias: 35mm (C) x 15mm (L) x 10mm (A).(figura 7) A amostra foi disposta no sentido transversal ao da aplicação da carga ao longo de seu comprimento (figura 8). Inicialmente partindo com carga de 100 Kgf (conforme registro na máquina) e aumento sucessivo de 100 Kgf, com a percepção de estalos na peça até a ruptura.

A área dos CDP utilizada para cálculo da tensão foi de $1,5 \text{ cm}^2$, obtida através das dimensões médias no sentido da aplicação da carga.

9.3 RESULTADOS

9.3.1 REGISTRO DAS CARGAS MÁXIMAS DE ROMPIMENTO.

Região defeituosa (com passagem de líquido)			Região aprovada (sem passagem de líquido).		
CDP	Carga (Tf)	Tensão (MPa)	CDP	Carga (Tf)	Tensão (MPa)
1	1,19	77,78	5	2,19	143,14
2	0,14	9,15	6	3,04	198,70
3	0,38	24,83	7	4,27	279,08
4	0,19	12,41	8	3,47	226,80

Tabela 1 – Resultado da carga e tensão de ruptura das amostras.

9.3.2 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DO ENSAIO.

Os valores dos resultados demonstraram a característica de maior resistência na região aprovada no ensaio END, ou seja, onde houve a união completa dos materiais e que não houve a passagem do material penetrante. A relação entre as tensões nas duas situações atingiu valores até 10 vezes maior.

A superfície das partes rompidas apresentou fratura frágil, falta de homogeneidade, existência de vazios e presença de inclusões. Além da localização da ruptura está concentrada sempre na zona de transição dos materiais.

NOTA: Os resultados obtidos das forças de ruptura e tensão servem como referência apenas para atender as necessidades deste trabalho e a análise da região testada, não sendo recomendados sua utilização para aplicação nos processos de fabricação dos discos de freio.



Figura 12 – Aspecto da superfície na região da fratura (Autor, 2016).

Os resultados deste ensaio de flexão foram caracterizados pela fragilidade da ruptura na junção dos materiais onde a fase elástica é muito pequena, comprometendo o resultado das propriedades mecânicas para uso em ensaios de tração, apresenta tenacidade mínima, sendo mais sujeitos a falhas internas estruturais onde a fratura pode ocorrer fora da linha neutra que divide as solicitações de tração e compressão ou por uma combinação de fatores, tamanho e orientação da falha, volume do corpo de prova (Batalha, 1987)

9.3.3 ANÁLISE PELO MÉTODO DE WEIBULL

Método amplamente aplicado na medição da resistência à tração de um material frágil e carregamento uniforme, com probabilidade de falha sob tensão. Devido sua versatilidade, apresenta uma grande variedade de formas, todas com uma propriedade básica e é estritamente crescente, estritamente decrescente ou constante. É um importante parâmetro que caracteriza a "fragilidade" de um material.

Inicialmente aplicado para ensaios de fadiga, porém foi abrangido o uso em outras áreas em análises de vida útil dos materiais utilizados pela engenharia, mais especificamente no campo de fenômenos como a distribuição da vida útil de algum objeto, especialmente quando o modelo de "elo mais fraco" é aplicado, ou seja, cada parte que forma a peça, quando a falha, desencadeará a falha da própria peça.

Neste processo de distribuição é possível uma aproximação sobre a vida útil da peça. Sua função densidade de probabilidade é dada por:

$$P_f = 1 - e^{-\left(\frac{\sigma}{\eta}\right)^\beta} \quad (5)$$

Onde:

P_f = Função densidade probabilidade;

σ = Tensão de flexão;

η = Constante de normalização;

β = módulo de weibull (fator de forma ou inclinação).

Quando adotado o parâmetro de forma $\beta = 1$, na equação (X), obtemos a densidade de probabilidade de forma exponencial com parâmetro α , ou seja, a falha pode ocorrer a qualquer tempo sem uma previsibilidade.

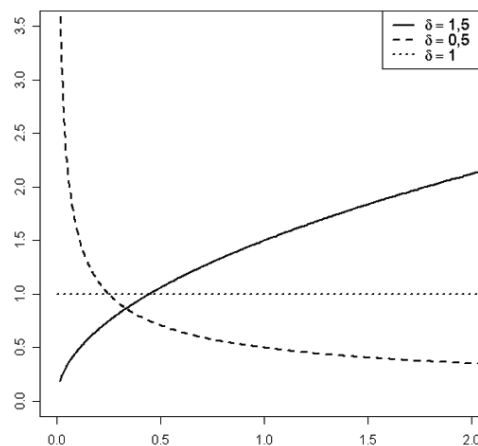


Figura 13 – Gráfico da distribuição de Weibull com $\alpha = 1$.

9.3.4 ELABORAÇÃO DO GRAFICO DE WEIBULL.

Para preparação do gráfico de distribuição de força Weibull utilizando os resultados do ensaio, foram utilizados os resultados obtidos de oito corpos de prova que apresentaram os seguintes resultados: 9,15 MPa, 12,41 MPa, 24,83 MPa, 77,78

MPa, 143,14 MPa, 198,7 MPa, 279,08 MPa. Inicialmente deve-se ordená-los de maneira crescente, conforme mostrado na tabela 2. 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.

$$P_i = \frac{i-0,5}{n} \quad (6)$$

Onde i é a numeração crescente do CDP e n é o número total de amostras

i	$\sigma(\text{MPa.})$	$x = \ln. \sigma$	P_i	$y = \ln. \ln(\frac{1}{1 - P_f})$
1	9,15	2,213753879	0,06	-2,740493007
2	12,41	2,518502599	0,19	-1,571952527
3	24,83	3,2120526	0,31	-0,981647055
4	77,78	4,353884329	0,44	-0,552752143
5	143,14	4,963823172	0,56	-0,190339326
6	198,70	5,29179615	0,69	0,151132538
7	279,08	5,631498479	0,81	0,515201894
8	450,00	6,109247583	0,94	1,019781441

Tabela 2 – Tabela da distribuição de Weibull

A equação (6) é amplamente utilizada para atribuir probabilidades de falha, após determinação da tensão da quebra e a probabilidade acumulada de falha (P_f). Como exemplo de cálculo da primeira amostra, quando $i = 1$ e $n = 8$, que é a quantidade total amostras, a probabilidade de falha (P_f) é estimada em 0,06 ou 6 %, como mostrado na quarta coluna da Tabela 2. A tensão característica em MPa ou parâmetro de Weibull de escala σ , indica o local de distribuição ao longo do eixo das abcissas (x), e desloca-se de acordo com o teste tamanho da amostra ou a quantidade de material que é mais solicitado. Para que seja feito um ajuste dos dados experimentais, considera-se que resistência à flexão do material segue a distribuição de Weibull, onde se obtém a reta de melhor ajuste, conforme figura 13 e, posteriormente, é determinado o β (fator de escala) através da reta paralela. Partindo do índice de 63,2% até interceptação da extremidade superior do gráfico e o coeficiente angular da reta m (módulo de Weibul). Materiais com módulos altos Weibull são mais previsíveis e menos propensos a quebrar com uma tensão muito menor de um valor significativo. Estudos têm demonstrado que, para amostragens em quantidades acima de 20, o gráfico apresenta estimativas menos inclinadas dos parâmetros de Weibull (Quinn, 2010).

9.3.5 GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL.

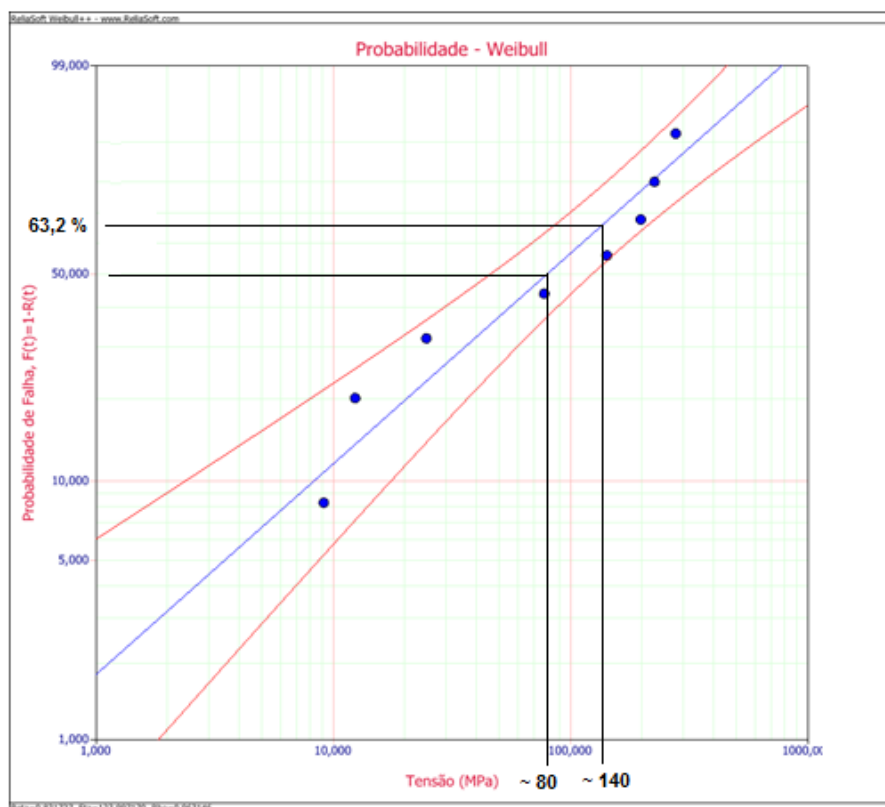


Figura 14 – Gráfico linear da Distribuição de Weibull.

Observando os valores obtidos no gráfico da figura 14, obtido através do programa Relia Soft, a probabilidade de 50% de falhar em torno de 80 MPa. e à 63,2%, 140 MPa. São resultados que experimentalmente atenderiam a um valor de tensão de segurança em serviço, indicado para informações de projeto. Foi obtido, neste programa, o valor do fator de forma, $\beta = 0,831727$. Este valor menor que 1, indicam possibilidade de falhas aleatórias e por mortalidade infantil.

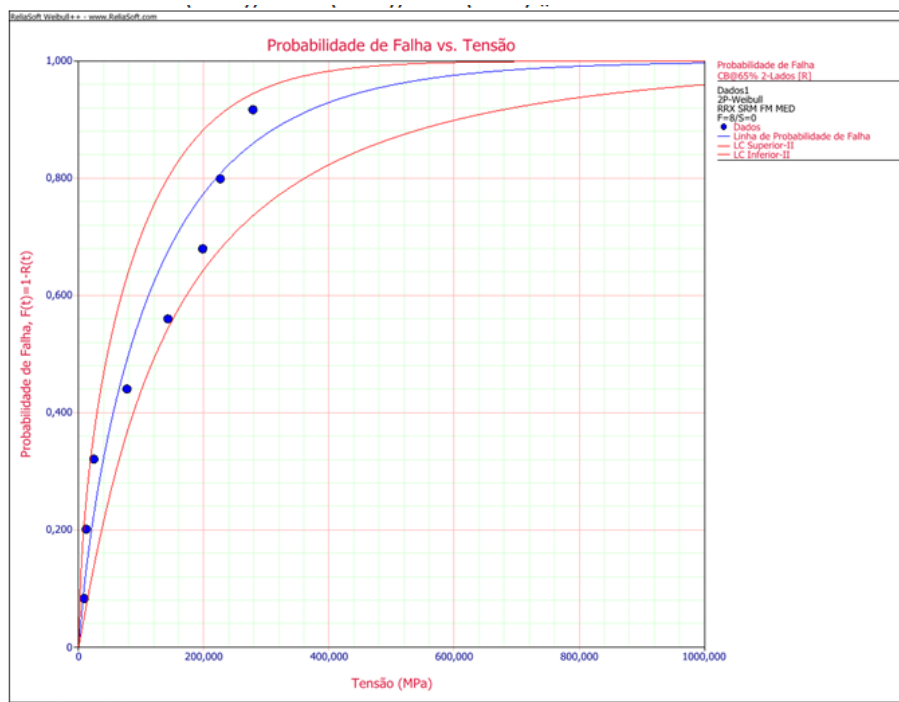


Figura 15 – Gráfico de probabilidade de falha X tensão.

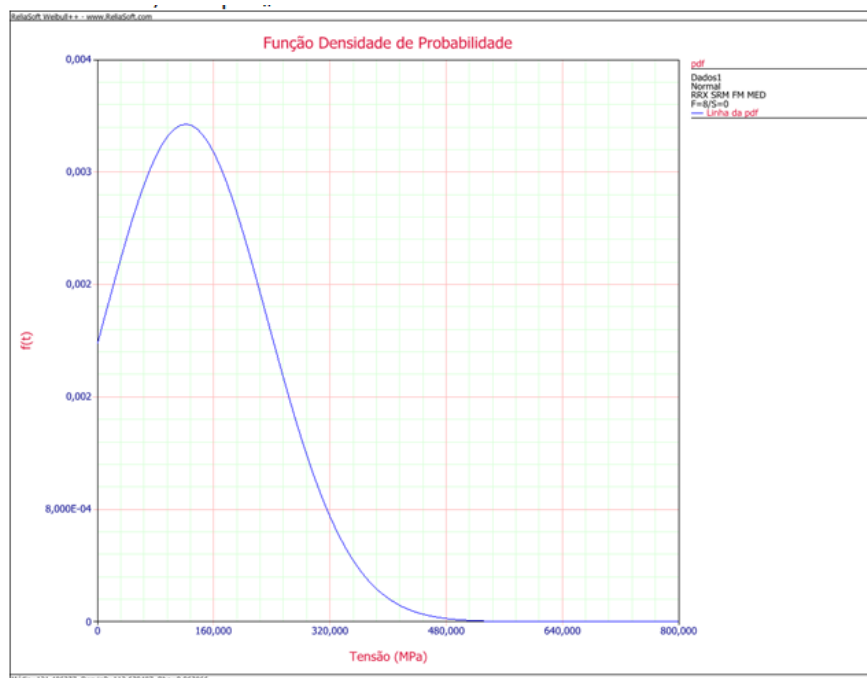


Figura 16 – Gráfico da FDP para distribuição normal.

A figura 16 mostra o gráfico com os resultados do ensaio, numa comparação em relação à distribuição normal (Gauss) em forma de sino. Utilizando o programa da Relia soft, obtém-se o valor de desvio médio da tensão $\sigma_m=121,49$ MPa. e desvio padrão = 112,64 MPa. Devido os dados negativos no eixo das abscissas, é evidente um grande deslocamento da curva para a esquerda demonstrando assimetria (negativa) da distribuição e a presença de um alto grau de achatamento (curtose) na região central, indicando uma “falsa” ideia de concentração de valores, ao contrário do comportamento disperso dos resultados práticos. Nota-se, também, a presença de probabilidade não nula para os valores negativos de tensão. Na avaliação destes resultados, seu uso para definição de parâmetros neste ensaio de flexão desenvolvido neste trabalho, não é recomendado.

10 CONCLUSÕES.

O resultado do ensaio de flexão mostrou-se interessante quanto à distribuição irregular dos resultados, ou seja, com grandes variações na força de separação da junção até o rompimento, onde a superfície apresentou um comportamento frágil. O CPD é um pequeno volume removido da região da junção e que recebe os esforços frenantes inerentes ao regime de trabalho de maneira isolada ou combinada. Para aceitação do produto final, um dos ensaios obrigatórios é o de esforço lateral do disco de freio que deve suportar uma força mínima de 1Tf, aplicada por compressão no raio da pista.

O trecho da junção possui baixa tenacidade, região elástica inexistente, onde o nascimento da fratura ocorre fora da linha neutra, pois são mais sujeita a defeitos microestruturais, consequência de incrustações e micro rachaduras, poros e inclusões dentro do material, são falhas dispersas e com distribuição aleatória cujo nascimento até a ruptura, não segue uma distribuição normal e regular, desta maneira não são recomendados outros ensaios convencionais como o de tração.

Diante da análise dos dados de resistência com esta variação inerente ao material, foi proposta uma abordagem para aplicação da melhor metodologia de avaliação de probabilidade de falha que atendesse as condições desta região crítica da junção, composta por materiais de comportamento mecânico diferente. A probabilidade desses defeitos sujeitos a uma tensão crítica até a ruptura de forma acumulada é aplicado no método da análise de Weibull.

Outra comprovação importante na formulação estatística do ensaio na determinação da resistência é pela falha mais crítica ou por uma “rede” de falhas encadeadas. O comportamento do gráfico pela análise de Weibull indicou tensão pontual para definição de projeto na faixa de 140 MPa. que deverá ser melhor estudado com o aumento de amostras, além das dificuldades no processo de usinagem no acabamento dimensional para uniformidade e precisão entre as amostras.

11 BIBLIOGRAFIA

BEER, F. P. & JOHNSTON, E. R., (1982), Resistência dos Materiais, Ed McGraw-Hill, São Paulo. PP 8-14.

NASH, W. A. **Resistência dos Materiais**: resumo da teoria, problemas resolvidos, problemas propostos. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil; Brasília: INL, 1981, (Coleção Schaum).

ZOLIN, I. **Ensaio Mecânico e Análise de Falhas** Santa Maria RS, 2011. <http://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo_ctrl_proc_indust/tec_autom_ind/ensaios_mec/161012_ens_mec_an_fal.pdf> Acessado em outubro de 2015.

SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânico de Materiais Metálicos: Fundamentos Teóricos e Práticos**. 5a. Ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1982. 286 p.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica - Processos de Fabricação e Tratamento**, Vol. 2, 2ª Edição. São Paulo: Editora McGraw-Hill, 1986.

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. São Paulo: Edgard Blücher, 2008, 652 p.

MARTINS, CARLOS FERNANDES **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 para inspeção** / C.F.Martins, P.F. Nucci. -- São Paulo, 2012. 193 p.

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

ROSS, SHELDON. **Probabilidade : um curso moderno com aplicações**, 8. ed. - Porto Alegre : Bookman, 2010. 608 p.

GARCIA, AMAURI, **Ensaio dos Materiais** – 2.^a edição – [Reimpr.], LTC, pp365, 2014.

BATALHA, G. F. – **Produto e Propriedades Mecânicas de Carbonetos Sinterizados (metais duros) Wc Co**, mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, 1987.

<http://cermat.ufsc.br/wp-content/uploads/2015/03/APOSTILA-DO-LABORATORIO-DE-PROPRIEDADES-MEC-160315.pdf>>Acessado em janeiro de 2016

<http://cursos.unisanta.br/mecanica/ciclo6/Fundicao.pdf> Acessado em março de 2016.

<http://www.portalaction.com.br/confiabilidade/412-distribuicao-de-weibull> Acessado em março de 2016.