

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

MADSON SOARES SIQUEIRA

**ESTUDO DE VIABILIDADE ESTRUTURAL:
DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA DE UM PERFIL COMPOSTO DE
SUCATA DE TRILHO FERROVIÁRIO, TIPO 2TR68, SUBMETIDO A ESFORÇO DE
FLEXÃO SIMPLES**

São Luis – MA
2016

MADSON SOARES SIQUEIRA

**ESTUDO DE VIABILIDADE ESTRUTURAL:
DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA DE UM PERFIL COMPOSTO DE
SUCATA DE TRILHO FERROVIÁRIO, TIPO 2TR68, SUBMETIDO A ESFORÇO DE
FLEXÃO SIMPLES**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão para obtenção do título de graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador (a): Me. Flávio Nunes Pereira

MADSON SOARES SIQUEIRA

**ESTUDO DE VIABILIDADE ESTRUTURAL:
DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA DE UM PERFIL COMPOSTO DE
SUCATA DE TRILHO FERROVIÁRIO, TIPO 2TR68, SUBMETIDO A ESFORÇO DE
FLEXÃO SIMPLES**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão para obtenção do título de graduação em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: ____ / ____ / _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Flávio Nunes Pereira (orientador)
Mestre em Engenharia Mecânica
Universidade Estadual de Campinas

Prof. Me. Abraão Ramos da Silva
Mestre em Engenharia de Produção
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Me. Paulo Roberto Campos Flexa Ribeiro Filho
Mestrado em Engenharia Mecânica
Universidade Estadual do Maranhão

Em primeiro lugar a Deus. À minha família,
em especial à minha filha, Maria Luísa, fonte
de inspiração.

AGRADECIMENTOS

A Deus acima de tudo, que tem me abençoado e guardado;

À minha mãe, que me mostrou o caminho da paciência e do amor.

Ao meu pai, extraordinário engenheiro, que mostrou este maravilhoso campo do saber.

Aos meus queridos irmãos, por estarem sempre ao meu lado sendo sempre meus verdadeiros amigos e companheiros.

À minha filha querida, Maria Luísa, que tanto amo, por me dar muito orgulho.

Aos meus colegas de curso e de futura profissão, que ao longo desta minha caminhada, compartilharam momentos e experiências. Em especial Amadeu Santos Nunes Junior, pela colaboração na execução dos ensaios de materiais; e Michael Serra, por ceder parte de seus livros, que auxiliaram na elaboração do presente trabalho.

Aos meus queridos professores, que têm dedicado parte de suas vidas a transferir o conhecimento, a fim de transformar vidas. Em especial, os professores Magalhães e Waldemar, exemplos incontestáveis de verdadeiros mestres, que tanto instigaram e empolgaram, conseguindo assim, com excelência nos repassar parte de seus conhecimentos. Ao professor Flávio Nunes, que me orientou.

À empresa MEMPS, que colaborou disponibilizando material e mão de obra para obtenção do material técnico desta pesquisa. E quanto à iniciação nesta carreira de engenheiro, possibilitando ainda mais meu desenvolvimento, aprimoramento a aplicação de parte do meu conhecimento, em especial Sofia Botelho, pessoa maravilhosa, que acreditou em mim.

A todos, meus agradecimentos.

“A imaginação é mais importante que o conhecimento”

Albert Einstein

RESUMO

A malha ferroviária brasileira é a maior da América Latina e é utilizada principalmente para o transporte de cargas. Dentro deste contexto verifica-se a geração de grande quantidade de sucata de trilhos desgastados e fadigados pelo uso, parte da qual é destinados à reciclagem em siderúrgicas e outra, considerável, é reutilizada para fins diferente para o qual foram produzidos, como por exemplo, estacas de fundação, vigas, suportes, defensas e etc.

O presente trabalho refere-se ao estudo de reutilização de sucatas de trilhos ferroviários tipo 2TR68 para fins estruturais como “gigantes” em uma cortina elástica de contenção de aterro. Para tanto, fez-se necessário uma recapitulação dos estudos da resistência dos materiais, fatores de segurança, ensaios de tração e muros de arrimo. Foi elaborado também o esquema arquitetônico e estrutural, os carregamentos sobre a cortina e a transmissão dos esforços deste sobre vigas verticais, chamados de “gigantes”, que são os responsáveis por transferir os esforços para o solo de fundação. A partir deste modelo estrutural calculou-se as solicitações e dimensionou-se a peça.

De acordo com as normas técnicas pertinentes ao assunto tiraram-se corpos de prova de material obtido junto à Companhia Vale proveniente da Estrada de Ferro Carajás, dos quais foram realizados ensaios de tração utilizando a máquina de ensaio universal Emic DL10000 em conjunto com o software Tesc versão 3.05 que gerou relatórios contento os dados dos corpos de prova, os valores obtidos pelo ensaio e o gráfico da curva tensão x deformação.

Procedendo a análise destes gráficos pôde-se determinar o valor representativo, o qual foi tomado como sendo o de resistência *característica inferior*. Tal valor foi satisfatório comparado às solicitações que os gigantes serão submetidos demonstrando assim a viabilidade de sua utilização para tal fim.

Palavras chave: Trilho TR68. Flexão. Muro de arrimo. Carregamento.

ABSTRACT

The Brazilian railway network is the largest in Latin America and is mainly used for cargo transportation. Within this context the generation of a large quantity of scrap from rails worn and fatigued by the use is verified, part of which is destined to the recycling in steelmakers and another considerable one, is reused for different purposes for which they were produced, Foundation stakes, beams, supports, fenders and so on.

The present work refers to the study of reuse of railroad scrap type 2TR68 for structural purposes as "giants" in an elastic curtain of landfill containment. To do so, it was necessary to recapitulate the studies of the strength of the materials, safety factors, tensile tests and retaining walls. The architectonic and structural scheme, the loadings on the curtain and the transmission of the efforts of this one on vertical beams, called "giants", that are the ones responsible for transferring the efforts to the foundation soil were also elaborated. From this structural model the requests were calculated and the part was dimensioned.

According to the technical norms pertinent to the subject, specimens were obtained from material obtained from *Companhia Vale* from the *Estrada de Ferro Carajás*, from which traction tests were performed using the Emic universal testing machine DL10000 in conjunction with the Tesc software Version 3.05 which generated reports containing the data of the test specimens, the values obtained by the test and the graph of the strain x strain curve.

By analyzing these graphs it was possible to determine the representative value, which was taken as the characteristic lower resistance. Such value was satisfactory compared to the requests that the giants will be submitted demonstrating the viability of its use for this purpose.

Keywords: Rail TR68. Flexion. Retaining wall. Loading.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Malha ferroviária brasileira | 11 |
| Figura 2 - Ponte com vigas de trilhos..... | 13 |
| Figura 3- Momento de uma força..... | 15 |
| Figura 4 - Forças externas | 16 |
| Figura 5 - Força interna distribuída..... | 17 |
| Figura 6 - Momento de inércia..... | 18 |
| Figura 7 - Teorema dos eixos paralelos para uma área | 20 |
| Figura 8 - Força aplicada perpendicularmente a uma viga | 20 |
| Figura 9 - Diagrama da força cisalhante | 21 |
| Figura 10 - Diagrama do momento fletor..... | 21 |
| Figura 11 - Diagrama de momento fletor com descontinuidade | 21 |
| Figura 12 - Gráfico tensão-deformação de um metal ou liga metálica | 24 |
| Figura 13 - Seção de corpo de prova..... | 25 |
| Figura 14 - Alongamento do corpo de prova | 26 |
| Figura 15 - Gráfico tensão x deformação..... | 27 |
| Figura 16 - Gráfico tensão x deformação - Limite de proporcionalidade | 28 |
| Figura 17 - Curva tensão deformação | 30 |
| Figura 18 - Fratura dúctil (esquerda) e frágil (direita) em um aço ao carbono | 32 |
| Figura 19 - Muro de contenção | 33 |
| Figura 20 - Parte de um muro com gigantes | 34 |
| Figura 21 - Corpo de prova | 36 |
| Figura 22 - Seção transversal do aterro..... | 37 |
| Figura 23 - Parte da seção longitudinal da cortina | 38 |
| Figura 24 - Triângulo de carregamento do empuxo | 41 |
| Figura 25 - Carregamento | 43 |
| Figura 26 - Força e Momento Resultantes | 43 |
| Figura 27 - Esforço cortante..... | 44 |
| Figura 28 - Momento fletor..... | 44 |
| Figura 29 - Seção transversal do perfil soldado | 46 |
| Figura 30 - Local de extração das amostras | 49 |
| Figura 31 - Dimensões do corpo de prova | 50 |
| Figura 32 - Processo de fabricação de corpo de prova reduzido..... | 50 |
| Figura 33 - Fotos dos corpos de prova produzidos | 51 |
| Figura 34 - Máquina universal de ensaio Emic DL 10000..... | 51 |
| Figura 35 - Ensaio de tração em corpo de prova..... | 52 |
| Figura 36 - Tensão de ruptura dos corpos de prova | 54 |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 11 |
| 2. JUSTIFICATIVA | 13 |
| 3. OBJETIVOS | 14 |
| 3.1. Geral | 14 |
| 3.2. Específicos | 14 |
| 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 4.1. Resistência dos materiais | 15 |
| 4.1.1. Força..... | 15 |
| 4.1.2. Efeitos de uma força sobre um corpo..... | 16 |
| 4.1.3. Conceituação dos esforços seccionais..... | 17 |
| 4.1.4. Geometria das massas..... | 18 |
| 4.1.5. Esforço Cortante V e Momento Fletor M_f | 20 |
| 4.2. Fator de segurança – FS (γ_m) (coeficiente de segurança) | 22 |
| 4.2.1. Método das tensões admissíveis..... | 22 |
| 4.2.2. Método dos Estados Limites..... | 23 |
| 4.3. Ensaio de tração | 24 |
| 4.3.1. Método do ensaio de tração..... | 25 |
| 4.3.2. Propriedades obtidas..... | 25 |
| 4.3.2.1. Tensão (σ)..... | 25 |
| 4.3.3. Deformação específica (ϵ)..... | 26 |
| 4.3.4. Módulo de elasticidade (E)..... | 26 |
| 4.3.5. Limite de escoamento e limite de proporcionalidade..... | 27 |
| 4.3.6. Resiliência..... | 29 |
| 4.3.7. Coeficiente de Poisson..... | 29 |
| 4.3.8. Limite de resistência (tensão máxima- σ_r) e Limite de Ruptura (tensão última- σ_u)..... | 29 |
| 4.3.9. Fratura dos corpos de prova..... | 31 |
| 5. MUROS DE ARRIMO OU CONTENÇÃO | 33 |
| 5.1. Muros com gigantes ou contrafortes | 34 |
| 6. METODOLOGIA DA PESQUISA | 35 |
| 6.1. Dados do projeto | 35 |
| 6.2. Cálculo dos esforços atuantes | 35 |
| 6.3. Ensaio do material | 36 |

| | |
|--|----|
| 7. DIMENSIONAMENTO DOS GIGANTES | 37 |
| 7.1. Critérios de projeto | 37 |
| 7.2. Perfil do terreno e desenho da cortina | 37 |
| 7.3. Carregamentos e esforços | 38 |
| 7.3.1. Cálculo das solicitações | 39 |
| 7.3.2. Dimensionamento do gigante..... | 45 |
| 8. ENSAIOS | 49 |
| 8.1. Corpo de prova | 49 |
| 8.2. Os ensaios | 51 |
| 8.3. Resultados | 52 |
| 9. RESULTADOS | 58 |
| 9.1. Cálculos de dimensionamento dos perfis submetidos à flexão | 58 |
| 9.2. Ensaio de tração | 58 |
| 9.3. Comparação dos valores obtidos | 59 |
| 10. CONCLUSÃO | 60 |
| REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA | 61 |

Dentro deste contexto, na manutenção das ferrovias é procedida a troca rotineira de elementos que não mais atendem às exigências deles requeridas, seja por desgaste e/ou outras causas, e deixam de desempenhar sua função satisfatoriamente. Entre tais elementos estão os trilhos ferroviários de aço, muitos dos quais são vendidos ou doados como sucata, e acabam retornando as siderúrgicas, onde são reciclados como matéria prima na fabricação de novos aços. Outra utilização deles é como elemento estrutural em casos onde podem ser submetidos a pequenas cargas e sofrer pequenas deformações devidas aos esforços a que são solicitados, tais como tração, compressão, flexão, torção ou combinação desses esforços. Porém, tal uso ainda não está regulamentado, inexistindo, portanto, parâmetros de norma para coeficientes de segurança a serem utilizados nos cálculos de dimensionamento estrutural.

As sucatas de trilhos ferroviários também são muito utilizadas na construção civil, mormente na execução de fundações profundas de prédios e obras de artes especiais (ponte, viadutos, etc.), onde funcionam como estacas de fundação, sendo que, para este fim, no Brasil, o assunto já está regulamentado pela norma da ABNT - NBR 6122/96.

2. JUSTIFICATIVA

A utilização de sucata de trilho, tipo TR68, como elemento estrutural submetido à flexão é empregada em diversas construções (figura 2). A abundância desta matéria prima em nossa região, devido a constante manutenção da Estrada de Ferro Carajás, que tem 892 km de extensão e é operada pela Vale SA., abre a oportunidade para utilização deste material para outros fins diversos para o qual foram fabricados. Tal utilização é feita de forma empírica, não se sabendo sua real capacidade de carga a flexão nestes casos, uma vez que sofreram desgaste e foram submetidos a esforços extremos.

Sendo assim, é preciso se estabelecer parâmetros, ou ao menos, que se prescrevam métodos de avaliação, para justificar e garantir o seu uso para outros fins. Para tanto, é preciso que haja estudo para desenvolver uma metodologia de ensaios destes materiais, os quais demonstrem suas reais propriedades.

No presente trabalho, baseado nos conhecimentos teóricos da mecânica dos materiais sobre elementos submetidos à flexão simples, determinar-se-á os esforços que a sucata de trilho ferroviário TR68 estará submetida e se comparará com os resultados das propriedades obtidas em laboratório, de modo a se determinar a viabilidade ou não do uso destes para fins estruturais.

Figura 2 - Ponte com vigas de trilhos



FONTE: 2 - <http://www.moncao.ma.gov.br/em-moncao-a-prefeitura-substitui-estrutura-de-pontes-de-madeira-por-outras-a-base-de-concreto-e-trilhos/>

3. OBJETIVOS

3.1. Geral

O presente trabalho tem por objetivo a determinação da capacidade de carga de um perfil soldado composto de 02 (duas) sucatas de trilho do tipo TR68, utilizado na função de gigantes (viga de sustentação) de uma cortina elástica de concreto armado que trabalhará submetido a um esforço de flexão.

3.2. Específicos

- Efetuar cálculos para o dimensionamento das peças submetidas à flexão;
- Executar ensaios de tração para determinar as propriedades mecânicas da sucata de trilho TR68;
- Comparar valores do pré-dimensionamento com os obtidos pelos ensaios;

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Resistência dos materiais

4.1.1. Força

a) Conceitos de força, movimento e deformação.

Conceitualmente, força é a grandeza física que tende a modificar o estado de repouso ou de movimento retilíneo uniforme de um corpo. Quando a força provoca a mudança completa de posição do corpo no espaço, a isto se denomina *movimento*. Porém, por efeito da força, apenas parte do corpo muda de posição, tem-se configurado uma *deformação*.

b) Definição matemática de força

Força é uma grandeza vetorial, logo se caracteriza por ter módulo, direção e sentido. A força por definição é diretamente proporcional à massa de um corpo e à aceleração que nele provoca, assim:

$$F = m \cdot a \quad (\text{Eq. 1})$$

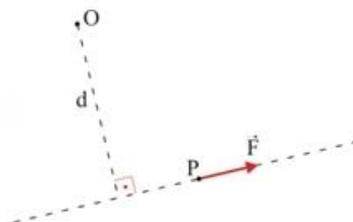
c) Momento de uma força em relação a um ponto

Fisicamente, podemos dizer que momento de uma força é a tendência que esta força tem de fazer girar um corpo em torno de um eixo.

Matematicamente, momento M de uma força F , em relação a um ponto O , é o produto do módulo desta força pela distância d entre o ponto O e a linha que contém a força F , donde a fórmula:

$$M = F \cdot d \quad (\text{Eq. 2})$$

Figura 3- Momento de uma força



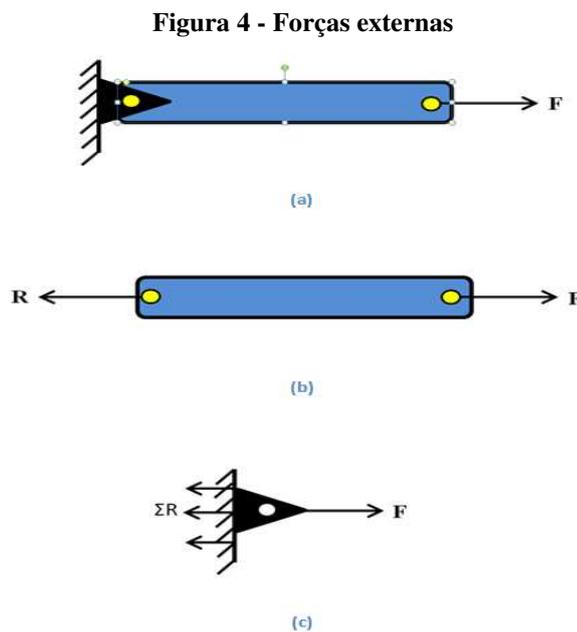
FONTE: 3- Própria

4.1.2. Efeitos de uma força sobre um corpo

A ação de uma força sobre um corpo gera nele efeitos em dois âmbitos: externos e internos. Veja a figura 4 abaixo, onde a força F , aplicada externamente à barra do suporte S , gera as forças reativas R e ΣR , sendo:

R – Reação do pino da rótula sobre a barra do suporte;

ΣR – Somatório das reação do elemento de fixação sobre o mancal.



FONTE: 4 - Autor, 2016

Conclui-se, portanto, que as forças atuantes externamente em qualquer corpo são de duas naturezas: ativa e reativa. Como provou Isaac Newton em outra de suas célebres leis que fundamentaram a mecânica moderna, “a toda ação corresponde uma reação, de mesma intensidade, mesma direção e sentido contrário”. Assim, não precisa fazer-se cálculo para saber que, em termos de módulo, $R = \Sigma R = F$.

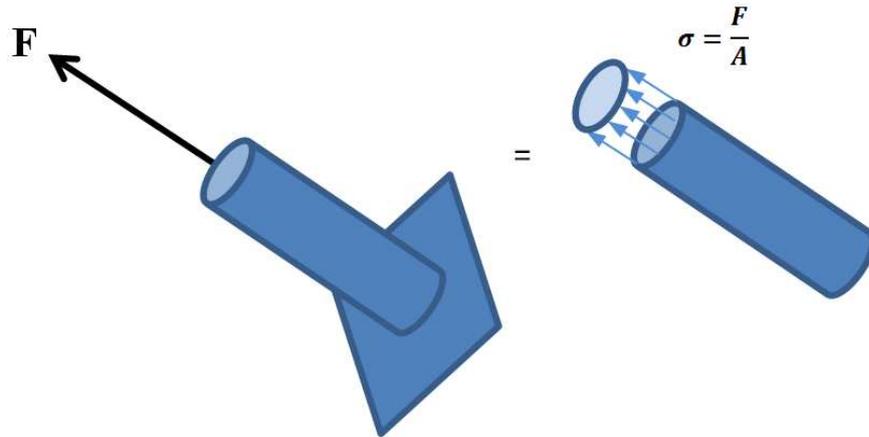
Conforme o conjunto estrutural representado na figura 4 anterior, verifica-se que a força externa F , além das reações externas mostradas, gera também reações internas, que são distribuídas por toda a peça.

Dessa forma, verificam-se na figura 5, as reações internas nela provocada pela força F dependem do material e da geometria da peça. Reações estas que são devidas à interatividade entre os elementos que compõe uma seção transversal da própria peça, e podem

ser quantificados pela razão entre a força F e a área A desta seção, ao que se denomina tensão e se representa pela letra σ (sigma), donde a fórmula:

$$\sigma = F/A \quad (\text{Eq. 3})$$

Figura 5 - Força interna distribuída



FONTE: 5 - Autor, 2016

Dependendo das condições de aplicação de uma força sobre um corpo, bem como dos vínculos e apoios que estão submetidos, poderão surgir várias solicitações (simples ou combinadas), às quais se dá o nome de esforços seccionais.

4.1.3. Conceituação dos esforços seccionais

a) **TRAÇÃO** – É a solicitação que tende a alongar a dimensão do corpo na direção e sentido de aplicação da força.

b) **COMPRESSÃO** – É a solicitação que tende a encurtar a dimensão do corpo na direção e sentido de aplicação da força.

c) **ESFORÇO CORTANTE** – É a solicitação que tende a deslizar uma seção do corpo sobre sua seção adjacente, na direção e sentido de aplicação desse esforço.

d) **MOMENTO FLETOR** – É a solicitação que tende a deformar o corpo transversalmente à direção de aplicação de uma força externa, ou de um binário, e que se caracteriza pelo surgimento conjugado de tensões de compressão e tração concomitantes.

e) **MOMENTO TORSOR** – É a solicitação que tende a provocar o deslizamento rotacional entre duas seções justapostas de um corpo.

4.1.4. Geometria das massas

É a parte da física que tem por objetivo quantificar a resistência de uma peça em função da sua forma e dimensões, sem levar em consideração os materiais que a constituem.

- Inércia – conceito:

Inércia é a propriedade que os corpos têm de manter o seu estado de repouso ou de movimento retilíneo uniforme. Vê-se, portanto, que a inércia tende a impedir o efeito da força, daí resultando a importância do seu estudo para a engenharia.

A fim de quantificar a inércia de um corpo, visando o estudo da sua estabilidade, determina-se algumas propriedades geométricas, entre as quais se considera de maior importância o *momento de inércia*, o qual se passa a estudar.

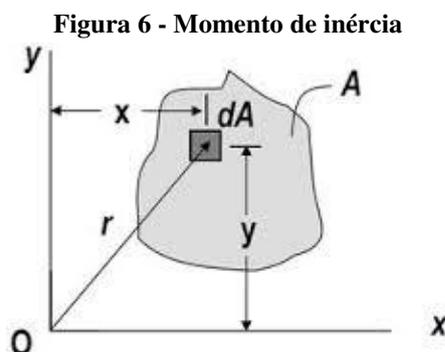
- Momento de inércia (I)

Segundo Hibbeler (2011) “sempre que uma carga distribuída atua perpendicularmente a uma área e sua intensidade varia linearmente, o cálculo do momento da distribuição de carga em relação a um eixo envolverá uma quantidade chamada *momento de inércia de área*.”.

Quando há forças distribuídas atuando perpendicularmente sobre uma área e a sua intensidade varia linearmente, é comumente necessário determinar o momento dessas forças em relação a algum eixo, no plano que contém a área, ou perpendicular a ele.

A força elementar atuando em um elemento de área, então, é proporcional ao produto da distancia pela área diferencial. Vemos, portanto, que o momento total envolve uma integral da forma (distância d)² pela diferencial dA (área).

Consideremos a figura abaixo,



FONTE: 6 - Autor, 2016

Por definição, chamamos de momentos de inércia retangulares do elemento dA em relação aos eixos x e y

$$I_x = \int y^2 dA \quad (\text{Eq. 4})$$

$$I_y = \int x^2 dA \quad (\text{Eq. 5})$$

O momento de inércia de dA em relação ao ponto O é chamado de *momento polar de inércia*, definido por:

$$I_z = \int r^2 dA \quad (\text{Eq. 6})$$

Fazendo,

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (\text{Eq. 7})$$

temos que,

$$I_z = I_x + I_y \quad (\text{Eq. 8})$$

Transferência de eixos paralelos (teorema de Steiner)

Com a utilização do teorema dos eixos paralelos podemos determinar o momento de inércia de uma área em relação a qualquer eixo que seja paralelo ao um eixo que passa pelo centroide.

Segundo Hibbeler (2011) “...o momento de inércia para uma área em relação a um eixo é igual ao seu momento de inércia em relação a um eixo paralelo passando pelo centroide da área mais o produto da área e o quadrado da distância perpendicular entre os eixos”.

A expressão para determinar o Momento de Inércia em relação a um eixo fora do centroide dado pelas fórmulas:

$$I_x = \bar{I}_x + Ad_y^2 \quad (\text{Eq. 9})$$

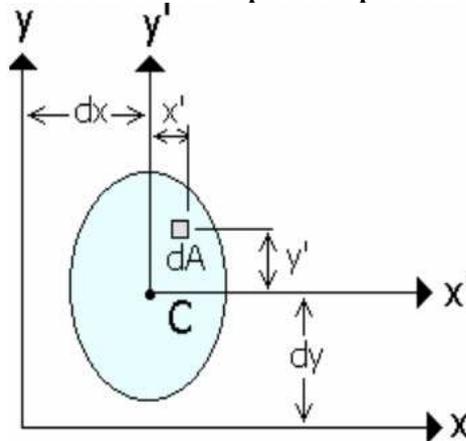
$$I_y = \bar{I}_y + Ad_x^2 \quad (\text{Eq. 10})$$

onde,

\bar{I}_x é o momento de inércia em relação ao eixo x_o .

\bar{I}_y é o momento de inércia em relação ao eixo y_o .

Figura 7 - Teorema dos eixos paralelos para uma área

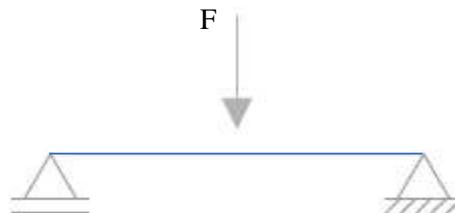


FONTE: 7 - Autor, 2016

4.1.5. Esforço Cortante V e Momento Fletor M_f

A aplicação de uma força F atuando na seção transversal de uma viga, conforme a figura 7 geram efeitos de cisalhamento e flexão. A força V é chamada força cisalhante, o conjugado M é chamado de momento fletor.

Figura 8 - Força aplicada perpendicularmente a uma viga

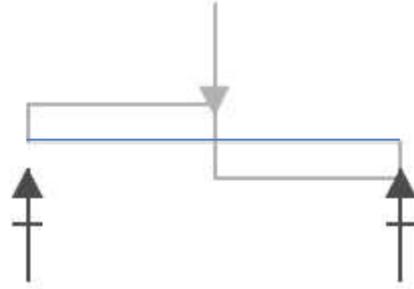


FONTE: 8 - Autor, 2016

Os valores da força cisalhante V e do momento fletor M_f variam de ponto para ponto ao longo do eixo da viga. Essas variações podem ser analisadas e obtidas utilizando-se o método das seções, em função da distância x , tomada a partir de uma das extremidades.

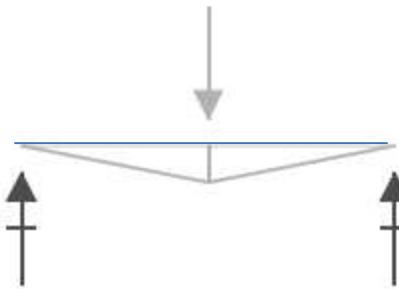
No entanto, essas variações são mais bem representadas graficamente, quando plotados em função do comprimento da viga, resultando nos *diagramas da força cisalhante* (figura 9) e do *momento fletor* (figura 10).

Figura 9 - Diagrama da força cisalhante



FONTE: 9 - Autor, 2016

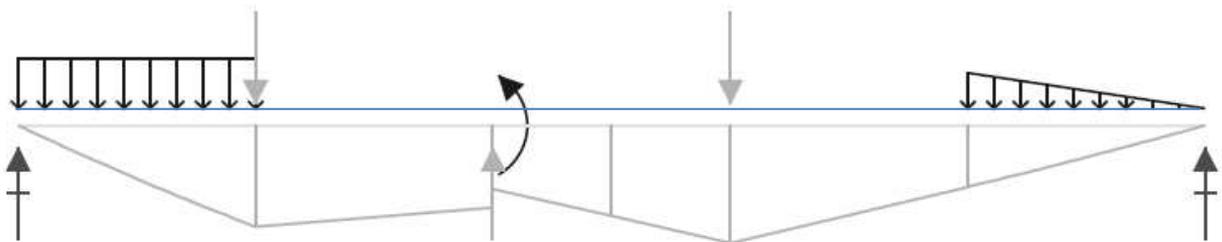
Figura 10 - Diagrama do momento fletor



FONTE: 10 - Autor, 2016

Em geral, as funções de esforço cortante V (força cisalhante) e de momento fletor M_f interno devem ser determinados para cada segmento da viga localizado entre descontinuidades de carregamento, que são pontos onde uma carga distribuída varia, ou onde forças ou momentos de binário concentrados são aplicados.

Figura 11 - Diagrama de momento fletor com descontinuidade



FONTE: 11 - Autor, 2016

A força de cisalhamento ΔV pode ser determinada pela integração da função em termos do carregamento w e a variação dx , conforme abaixo:

$$\Delta V = \int w(x) \cdot dx \quad (\text{Eq. 11})$$

Variação no esforço cortante = Área sob a curva de carregamento

O momento fletor pode ser plotado em função do esforço cortante V e da variação dx conforme abaixo:

$$\Delta M = \int V \cdot dx \quad (\text{Eq. 12})$$

As equações acima não se aplicam em pontos onde atua uma força ou momento binário concentrado. Como mencionado esses dois casos especiais criam descontinuidades nos diagramas de esforço cortante e momento fletor.

Essas informações da força cisalhante V e do momento fletor M_f são necessárias para a análise de projetos e execução de elementos submetidos à flexão. Pois serão a partir destes que serão determinadas as tensões internas que os materiais estarão submetidos.

4.2. Fator de segurança – FS (γ_m) (coeficiente de segurança)

4.2.1. Método das tensões admissíveis.

Neste método, o dimensionamento da estrutura é considerado satisfatório quando a máxima tensão solicitante σ_d , em cada seção, é inferior à tensão resistente do material, reduzida ainda da minoração obtida pela aplicação de um coeficiente de segurança γ_m .

$$\sigma_{m\acute{a}x} < \bar{\sigma} = \frac{f_{yk}}{\gamma_m} \quad (\text{Eq. 13})$$

Onde $\bar{\sigma}$ - tensão admissível.

Este fator de segurança FS (ou coeficiente de segurança γ_m) traduz o reconhecimento de que existem diversas fontes de incerteza de um projeto, como por exemplo:

- Magnitude e distribuição do carregamento;
- Características mecânicas dos materiais;
- Modelagem estrutural;
- Imperfeições na execução dos elementos estruturais ou de máquinas.

Para limitar essas incertezas nos projetos, segundo Walter Pfeil (2015, p.36):, foram adotadas algumas medidas, tais como:

- Padronização dos testes para determinação de características dos materiais;
- Especificação de limites ou tolerâncias nas imperfeições de fabricação e execução;
- Desenvolvimento de métodos de análise estrutural adequados, identificando-se as diferenças entre a estrutura real e o modelo;
- Estudo estatístico dos carregamentos ou especificações de níveis extremos de carga baseados em experiência anterior.

Uma das limitações deste método é o agrupamento das incertezas em um único coeficiente de segurança para expressar todas elas.

4.2.2. Método dos Estados Limites.

Segundo Walter Pfeil (2015, p.37), o **Estados limites últimos**, a garantia de segurança no método dos estados limites é traduzida pela equação de conformidade, para cada seção da estrutura:

$$S_d = S(\Sigma \gamma_{fi} \cdot F_i) < R_d = R(f_k / \gamma_m) \quad (\text{Eq. 14})$$

onde, a solicitação de projeto S_d (o índice d provém da palavra inglesa design) é menor que a resistência de projeto R_d .”

Esta técnica nos mostra que a solicitação (ações) é obtida a partir de uma combinação de forças e cargas externas e/ou permanentes, cada qual majorada por um coeficiente adequado γ_{fi} , enquanto a resistência de projeto é função da resistência do material f_k , minorada por um coeficiente γ_m . Este método trata as incertezas de forma mais racional.

A escolha do coeficiente de segurança é uma tarefa de responsabilidade. Valores muito altos significam, em geral, custos desnecessários e valores baixos podem provocar falhas de graves consequências.

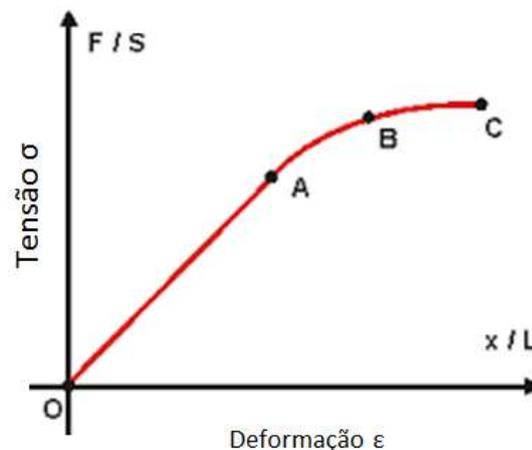
4.3. Ensaio de tração

Dentre os ensaios mecânicos de materiais metálicos, o de tração é um dos mais importantes devido à facilidade de execução e reprodutividade.

A qualidade do ensaio depende dos equipamentos utilizados e do correto emprego das técnicas do ensaio, como por exemplo, fixação e alinhamento dos corpos de prova na máquina, colocação dos extensômetros e da velocidade de execução do teste.

Podemos afirmar que neste tipo de ensaio as deformações no material são uniformemente distribuídas em todo seu corpo até ser atingido um valor máximo de tensão, o que ocorre próximo ao final do ensaio; e devido à possibilidade da baixa velocidade do experimento, consegue-se medir com satisfação a resistência do material e a variação da deformação em decorrência das tensões aplicadas sobre o mesmo. Estes dados são mostrados através da linha composta pelos pontos correlacionados das medidas de tensão e consequente deformação que crescem continuamente (fig. 12).

Figura 12 - Gráfico tensão-deformação de um metal ou liga metálica



4.3.1. Método do ensaio de tração

As hastes metálicas (corpo de prova) são presas com garras especiais em equipamento próprio, no qual se aplica uma carga crescente ao longo do eixo axial da peça e tende a esticá-la (ou alongá-la) até a sua ruptura; enquanto são aferidos os valores das cargas no equipamento, e das deformações no corpo de prova, através de aparelhos especiais. Geralmente os corpos de prova são padronizados para que possam obter-se resultados que sejam comparados e/ou confirmados.

4.3.2. Propriedades obtidas

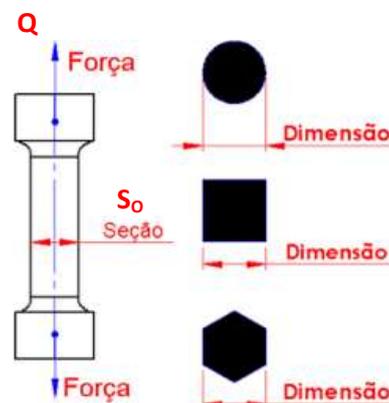
Através deste ensaio é possível medir algumas propriedades mecânicas dos materiais metálicos.

4.3.2.1. Tensão (σ)

As tensões (σ) são obtidas através da relação da força Q , aplicada pelo equipamento sobre um corpo de prova, e a área da seção transversal do corpo, transversal à força (fig. 13):

$$\sigma = \frac{Q}{S_0} \quad (\text{Eq. 15})$$

Figura 13 - Seção de corpo de prova



FONTE: 13 - Autor, 2016

4.3.3. Deformação específica (ε)

É a razão entre a deformação ΔL que uma força produz num corpo e o comprimento L_0 inicial dele antes que a força nele atuasse.

Para a obtenção da deformação específica em uma barra sob carregamento axial, que é a deformação por unidade de comprimento da barra (fig. 14), é calculada pela seguinte relação:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (\text{Eq. 16})$$

Onde:

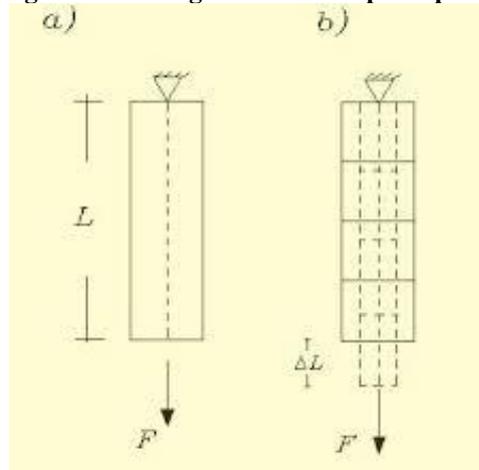
ε = deformação específica

$\Delta L = L_f - L_0$ = Variação da deformação

L_f = Deformação/Comprimento final

L_0 = Deformação/Comprimento inicial

Figura 14 - Alongamento do corpo de prova



FONTE: 14 - Autor, 2016

4.3.4. Módulo de elasticidade (E)

Vemos que a relação tensão-deformação inicial do gráfico da fig. 13 gera uma reta de origem em O até o ponto A. Nesta região OA, que é a zona elástica, a tensão σ é diretamente proporcional à deformação ε . Esta relação é conhecida como lei de Hooke.

Se todo o carregamento dentro desta faixa for aliviado, o material retorna para o ponto de origem O, sem apresentar qualquer deformação permanente (livro - ensaio). Esta relação pode ser representada pela seguinte equação:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (\text{Eq. 17})$$

ou

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{Eq. 18})$$

Onde:

σ é a tensão aplicada

E é a constante de proporcionalidade (módulo elasticidade ou módulo de Young).

ε é a deformação

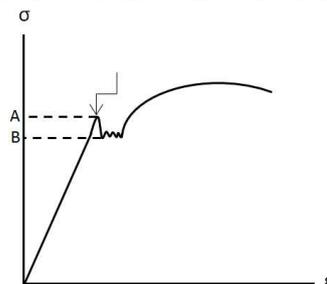
A constante de elasticidade E , à temperatura ambiente, é único para cada tipo de metal ou liga, e representa a capacidade que o material tem de resistir à deformação, ou seja, sua rigidez.

Submetidos a cargas de igual valor, o material que tenha módulo de elasticidade maior que outro, irá se deformar menos, portanto, o primeiro é mais rígido que o segundo. Tal propriedade se deve à ligação atômica dos materiais metálicos. Quando é aplicada uma força no material, na zona elástica, os átomos sofrem um distanciamento, contrapondo-se à força atômica atrativa, porém, sem sofrer a quebra destas ligações. E, ao retirar a força aplicada, os átomos retornam às suas posições de origem.

4.3.5. Limite de escoamento e limite de proporcionalidade

Ao final do regime elástico, alguns materiais tendem a continuar se deformando, mesmo que o valor da tensão permaneça constante, apresentando neste ponto uma propriedade nítida, chamada de escoamento. Esta tensão é denominada de *limite de escoamento* (f_y) do material.

Figura 15 - Gráfico tensão x deformação



FONTE: 15 – Autor, 2016

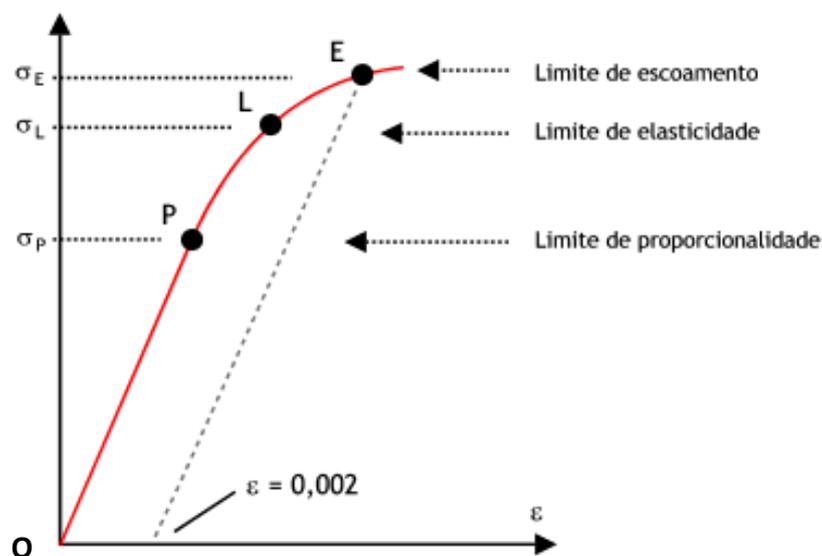
Em alguns casos, o material metálico apresenta transição gradual da deformação, do estado elástico para o plástico, não apresentando tensões bem definidas de proporcionalidade e escoamento, conforme figura 16. O limite de proporcionalidade σ_p , que ocorre até o ponto P da figura 16, é a máxima tensão a que uma peça pode ser submetida para que ocorra a deformação ε proporcional à tensão σ . “Após o limite de proporcionalidade, os materiais poderão ainda apresentar uma pequena quantidade de deformação elástica, mas de caráter não linear, e logo após essa pequena deformação o material deverá iniciar o estágio de escoamento, produzindo assim uma deformação de caráter permanente, ou plástica.” (GARCIA, 2012, p. 20). O ponto L da figura 16 representa o valor a partir do qual passa haver deformações permanentes no material denominado limite elástico.

Para a determinação do limite de escoamento admite-se uma deformação residual. No caso dos metais e suas ligas admite-se uma deformação de 0,2%, ou seja, 0,002 de deformação por unidade de comprimento, depois que ultrapassa o limite de proporcionalidade. Já no caso de aços ou ligas não ferrosas muito duras, pode-se adotar 0,1% ou mesmo 0,01% para aços molas.

Para se determinar estes valores adota-se o seguinte procedimento:

A partir do gráfico tensão-deformação obtém-se no eixo da deformação o ponto ε que corresponde à deformação residual \underline{n} , traçando a partir deste ponto uma reta paralela à reta OP da curva elástica. O ponto E de interseção, representa o *limite de escoamento convencional* com valor da tensão $\sigma_{E=0,2\%}$.

Figura 16 - Gráfico tensão x deformação - Limite de proporcionalidade



FONTE: 16 - Autor, 2016

4.3.6. Resiliência

A resiliência é a capacidade que o material tem de absorver e liberar energia quando deformado dentro da zona elástica. Ela é quantificada pelo módulo de Resiliência (U_R), que é a energia de deformação por unidade de volume até o limite de proporcionalidade.

O módulo de resiliência é determinado conforme abaixo.

$$U_R = \frac{\sigma_p}{2} \cdot \varepsilon_p = \frac{\sigma_p}{2} \cdot \frac{\sigma_p}{E};$$

Portanto,

$$U_R = \frac{\sigma_p^2}{2E}$$

4.3.7. Coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson representa a relação entre a deformação ε' sofrida na seção transversal à aplicação da tensão em relação à deformação sofrida na direção da tensão σ .

$$\nu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}$$

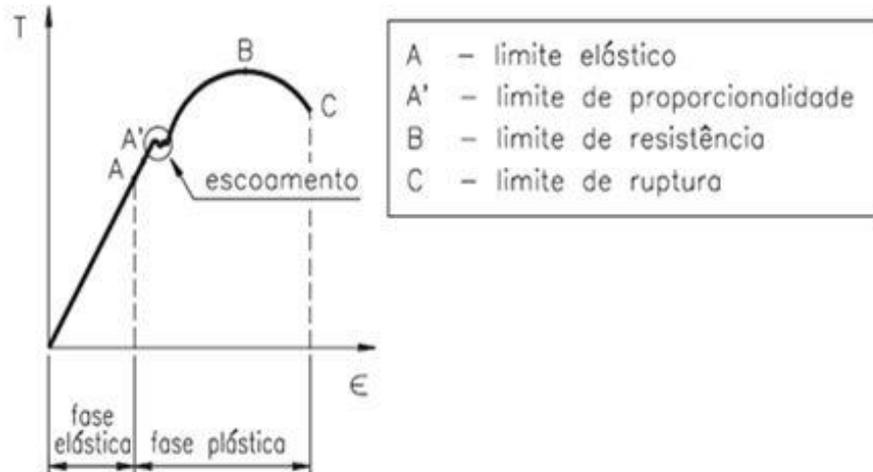
“Ela mede a rigidez do material na direção perpendicular à direção da carga de tração uniaxial aplicada” (SOUSA, 2000, pg. 32).

4.3.8. Limite de resistência (tensão máxima- σ_r) e Limite de Ruptura (tensão última- σ_u)

O limite de resistência é o máximo valor atingido no ensaio de tração. É representado pelo ponto B na curva tensão-deformação de engenharia da fig. 17. Ela ocorre na zona plástica após o escoamento do material e corresponde a máxima tensão que o material pode suportar.

Após ser atingindo este ponto, chega-se a fase de ruptura do material, onde ocorre o fenômeno da estrição, que é uma diminuição da seção transversal numa parte confinada do material na qual passará a sofrer toda a deformação e conseqüente ruptura. Nesta nova fase a partir do ponto B o material deforma-se até uma tensão que corresponde à fratura no ponto C da fig. 17, chamada de limite de ruptura (σ_u).

Figura 17 - Curva tensão deformação



FONTE: 17 - Figura 16 (<http://www.infoescola.com/fisica/ensaio-de-tracao/>)

O limite de resistência é determinado pela expressão abaixo:

$$\sigma_r = \frac{Q_r}{S_0} \quad (\text{Eq. 19})$$

Onde,

σ_r é Limite de resistência

Q_r é a carga máxima atingida durante o ensaio

S_0 é a área da seção transversal do corpo de prova

Podemos ainda determinar a estrição em valores percentuais, pela diminuição da seção transversal após a ruptura, conforme abaixo

$$\varphi = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 20})$$

Onde

φ valor percentual da estrição

S_0 é a área inicial da seção transversal do corpo de prova

S é a área final da seção transversal do corpo de prova após ruptura

4.3.9. Fratura dos corpos de prova

Em alguns casos, não há uma linearidade dos resultados obtidos para os diversos materiais, mas é possível haver um agrupamento.

Os diagramas tensão-deformação dos materiais variam muito, e ensaios de tração diferentes, executados com o mesmo material, podem produzir resultados diferentes, dependendo da temperatura do corpo de prova e da velocidade de aplicação da carga. No entanto, é possível distinguir algumas características comuns entre os diagramas tensão-deformação de vários grupos de materiais e, assim, dividir os materiais em duas categorias principais com base nessas características, ou seja, materiais *dúcteis* e materiais *frágeis*. (BEER, 2015, pg. 53).

A deformação plástica que se observa na região a partir do limite de escoamento até o limite de resistência está relacionada com o fenômeno do *encruamento*, que causa o endurecimento e aumento da resistência do material. Ele é devido o movimento de discordâncias e imperfeições presentes no material.

Segundo Amauri Garcia (2012) “A deformação plástica geralmente ocorre através de um mecanismo de escorregamento, no qual os planos atômicos mais densamente compactados se movem uns sobre os outros. Para um determinado conjunto de planos densamente compactados e suas respectivas direções, o escorregamento ocorrerá preferencialmente naqueles em que a tensão de cisalhamento é máxima, o que corresponde a uma direção a 45° do eixo de aplicação da tensão de tração.”.

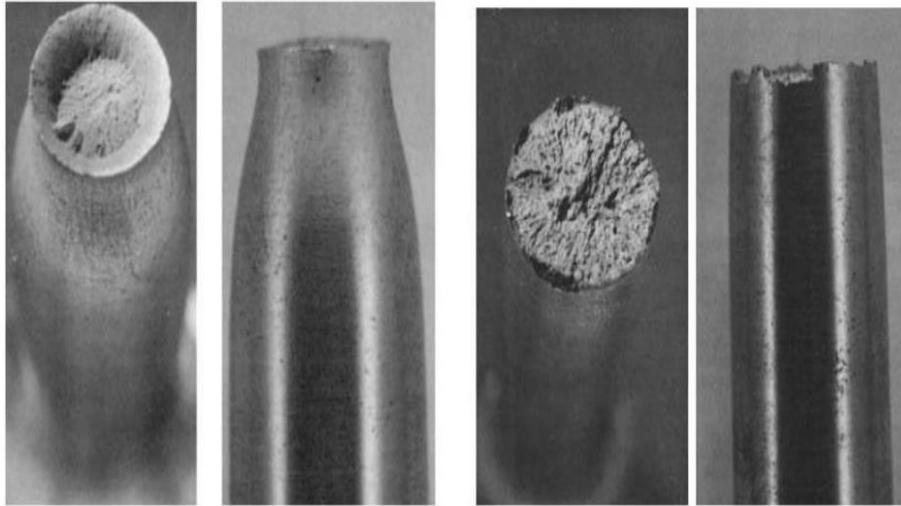
Após o material ter atingido o valor máximo de encruamento na tensão máxima (σ_r) todas as mobilidades possíveis já foram atingidas. E mantendo-se ou elevando a esta tensão iniciará o processo de fratura do material, com a quebra das ligações atômicas e conseqüente separação física. Este processo ocorre com o surgimento de núcleos de separação (nucleação) na região de estrição do corpo de prova, propagando trincas gradualmente e de maneira estável.

Quando o material tiver característica dúctil apresentará uma zona fibrosa no centro do corpo de prova, uma zona radial e a de cisalhamento nas bordas denominada “cone”.

“Quanto menos dúctil for o metal, menor será o tamanho da zona fibrosa, até se tornar macroscopicamente nula, sendo a fratura considerada de caráter frágil” (Sérgio Augusto de Sousa, pg. 69).

Segundo Amauri Garcia “De modo geral, a fratura pode ser classificada em duas categorias, fratura frágil e fratura dúctil. A fratura dúctil é caracterizada pela ocorrência de uma apreciável deformação plástica antes e durante a propagação da trinca. A fratura frágil nos metais é caracterizada pela rápida propagação da trinca, com nenhuma deformação macroscópica e muito pouca deformação microscópica.”.

Figura 18 - Fratura dúctil (esquerda) e frágil (direita) em um aço ao carbono



FONTE: 18 – Garcia, Amauri (2012)

5. MUROS DE ARRIMO OU CONTENÇÃO

Muros de arrimo são métodos utilizados para conter encostas, ou seja, tipo de construções feitas para estabilizar o talude natural do terreno (figura 17).

Figura 19 - Muro de contenção



FONTE: 19 - <https://blogdopetcivil.com/tag/muro-de-gravidade/>

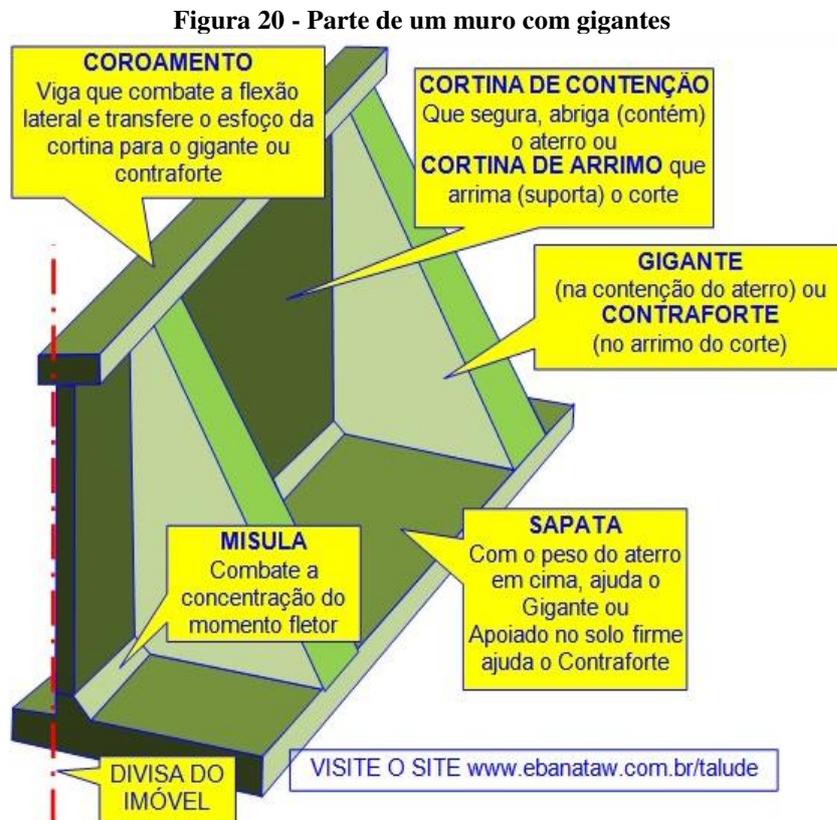
Para equilibrar as pressões provocadas pelo empuxo de terra, as cargas verticais devem ser pelo menos iguais ao dobro da grandeza do empuxo. Isso pode ser obtido contando com peso próprio do muro ou como parte do próprio peso da terra, responsável pela carga lateral.

Tipos de muro de arrimo:

- Por gravidade;
 - Perfil retangular
 - Perfil trapezoidal
 - Perfil escalonado
 - Estrutura de ponte
 - Muros contrafortes ou gigantes
- De concreto armado.
 - Muros isolados
 - **Muros com gigantes ou contrafortes**
 - Muros ligados às estruturas

5.1. Muros com gigantes ou contrafortes

Esse tipo de estrutura é composto pelos elementos conforme a figura abaixo:



FONTE: 20 - <http://www.ebanataw.com.br/talude/arrimoXcontencao.htm>

- **Cortina de contenção:** são consideradas como lajes verticais contínuas. Recebendo como ação a pressão exercida pelo empuxo de terra;
- **Coroamento:** vigas longitudinais que combate a flexão lateral e transfere os esforços da cortina para os gigantes;
- **Gigantes:** São vigas verticais espaçadas a alguns metros destinados a suportar esforços de flexão que recebem as solicitações da cortina e do coroamento e as transfere para o solo de fundação.
- **Mísula:** Elemento da estrutura que combate a concentração do momento fletor;
- **Sapata:** Laje horizontal é o elemento estrutural no qual, aproveitando-se do peso próprio do aterro arrimado, este se apoia para equilíbrio da estrutura.

6. METODOLOGIA DA PESQUISA

Esta seção aborda a metodologia desenvolvida para realização deste trabalho a fim de se obter dados e estudo da viabilidade da utilização de sucatas de trilho com gigantes de uma cortina elástica.

Inicialmente, levantaram-se informações através da revisão bibliográfica em artigos e livros publicados acerca dos assuntos sobre: normas de ensaios mecânicos de tração; estudo da estática e resistência dos materiais, em especial dos elementos submetidos à flexão.

Procedeu-se a cálculos a fim de dimensionar e estabelecer parâmetros e/ou limites de resistências dos elementos ora estudados; Produziram-se corpos de prova (CP) a partir das sucatas de trilho TR68 dentro dos padrões estabelecidos pelas normas referentes ao assunto e posteriormente submetidas aos ensaios mecânicos de tração. E por fim, através de parecer estabeleceu-se a viabilidade ou não da utilização dos trilhos como vigas.

6.1. Dados do projeto

Dados necessários para elaboração do presente trabalho foram levantados dados em campo, como altura e comprimento do aterro. Outras informações necessárias foram concedidas pela empresa MEMPS, tais como:

- **Sondagem geotécnica** para determinação do tipo do material do aterro (Anexo A);
- **Trilhos tipo TR68** para conferência das dimensões e execução dos ensaios dos materiais;
- **Anteprojeto** para estudo da viabilidade estrutural.

6.2. Cálculo dos esforços atuantes

A partir dos dados levantados, do anteprojeto e adotando-se coeficientes de segurança de acordo com a norma referente ao assunto, procedemos aos cálculos das ações atuantes sobre a estrutura decorrente do carregamento de empuxo exercido pelo Aterro conforme a Eq. 21; posteriormente gerou-se os gráficos do momento fletor M_f e esforço cortante V utilizando o software Ftool.

Baseados nos valores máximos obtidos destes gráficos e através da equação da tensão de elementos submetidos à flexão, procedemos aos cálculos para determinar os valores máximos da tensão de serviço ($\sigma_{\text{máx}}$) a que os elementos hora estudados estarão submetidos.

$$\varepsilon = 0,5 \cdot K \cdot \gamma \cdot h^2 \quad (\text{Eq. 21})$$

6.3. Ensaio do material

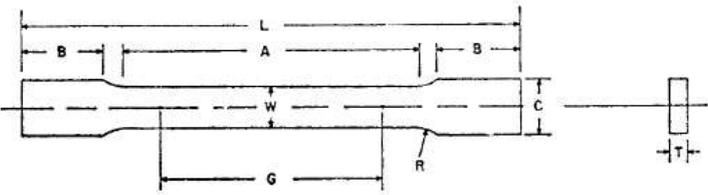
O material escolhido como elemento estrutural do presente estudo foi a sucata de trilho ferroviário tipo TR68. Devido a falta de informação quanto suas propriedades físicas, realizou-se ensaio mecânico de tração para determinação da capacidade de carga deste material.

Para o ensaio de tração foram utilizados 06 (seis) corpos de prova segundo a Norma ASTM E-8/E8M (figura 21), utilizando a máquina de ensaio universal Emic DL10000, com o auxílio do software Tesc versão 3.05.

Após a realização de cada ensaio foi gerado um relatório contendo os dados do corpo de prova, os valores obtidos pelo ensaio e o gráfico da curva tensão x deformação (ANEXO B).

Figura 21 - Corpo de prova

 **E8/E8M - 11**



| | Dimensions | | |
|--|---------------------------------------|---|-------------------------------|
| | Standard Specimens | | Subsize Specimen |
| | Plate-Type, 40 mm [1.500 in.] Wide | Sheet-Type, 12.5 mm [0.500 in.] Wide | 6 mm [0.250 in.] Wide |
| | mm [in.] | mm [in.] | mm [in.] |
| G—Gage length (Note 1 and Note 2) | 200.0 ± 0.2 [8.00 ± 0.01] | 50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005] | 25.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.003] |
| W—Width (Note 3 and Note 4) | 40.0 ± 2.0 [1.500 ± 0.125, -0.250] | 12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010] | 6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005] |
| T—Thickness (Note 5) | | thickness of material | |
| R—Radius of fillet, min (Note 6) | 25 [1] | 12.5 [0.500] | 6 [0.250] |
| L—Overall length, min (Note 2, Note 7, and Note 8) | 450 [18] | 200 [8] | 100 [4] |
| A—Length of reduced section, min | 225 [9] | 57 [2.25] | 32 [1.25] |
| B—Length of grip section, min (Note 9) | 75 [3] | 50 [2] | 30 [1.25] |
| C—Width of grip section, approximate (Note 4 and Note 9) | 50 [2] | 20 [0.750] | 10 [0.375] |

FONTE: 21 - ASTM E8/E8M

7. DIMENSIONAMENTO DOS GIGANTES

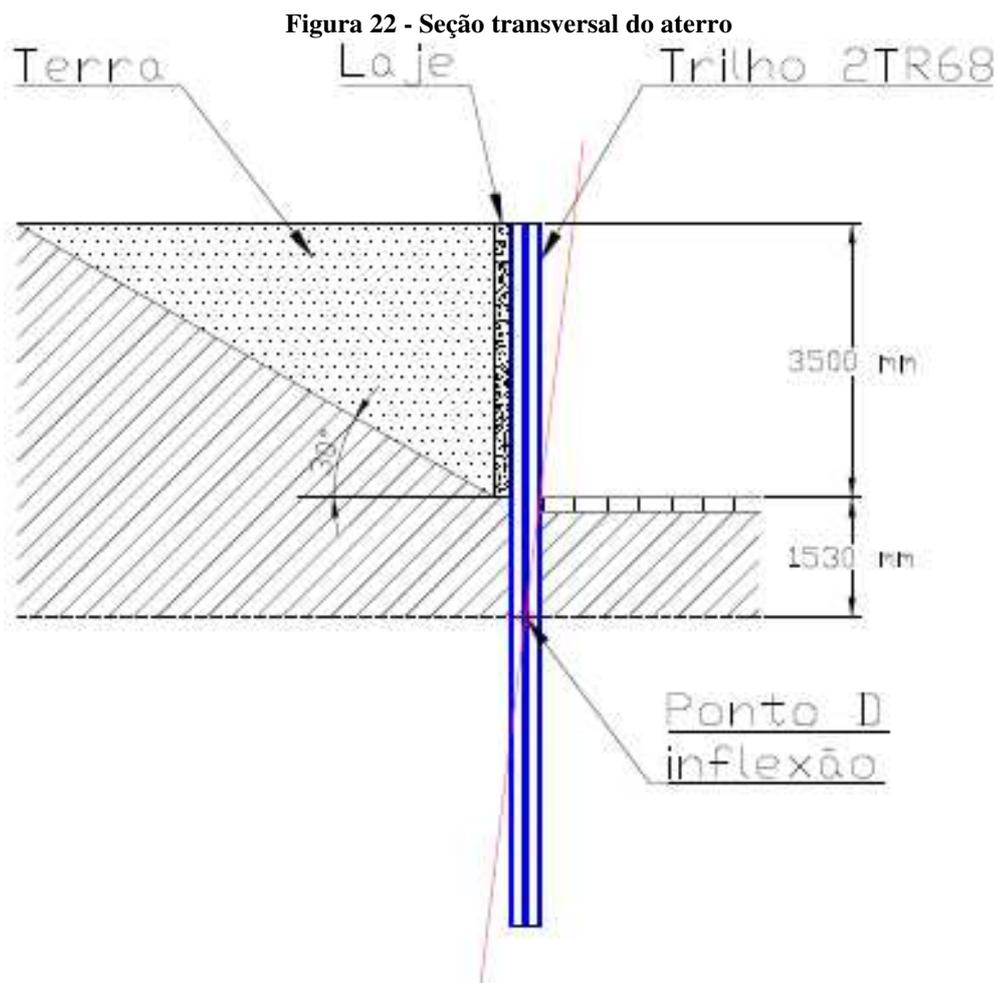
7.1. Critérios de projeto

OBRA: Projeto de construção de uma cortina elástica de concreto armado nervuradas ser executado na Praia do Olho D'água, em São Luís do Maranhão.

SERVIÇO: Dimensionamento dos gigantes metálicos de perfis compostos de sucata de trilho ferroviário 2TR68.

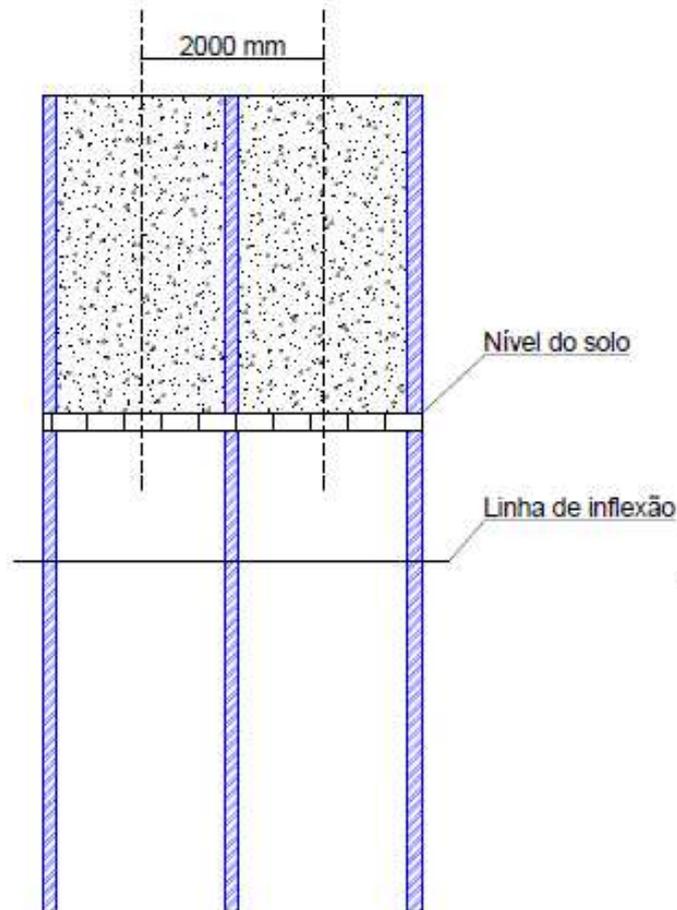
7.2. Perfil do terreno e desenho da cortina

Apresenta-se nas figuras abaixo as características geométricas do aterro.



FONTE: 22 - Desenho próprio

Figura 23 - Parte da seção longitudinal da cortina



A partir do pré-projeto acima demonstrado e da análise da sondagem geotécnica (ANEXO A), temos:

| | |
|--|--------------------------------|
| Altura do muro | $h_1 = 3,5\text{m}$ |
| Carga aplicada no topo (vertical) | $G_o = 0$ |
| Sobrecarga no terreno junto ao muro | $q_2 = 0$ |
| Ângulo de talude natural da areia (Tabela 3 da NBR 6120-ANEXO C) | $\varphi = 30^\circ$ |
| Peso específico da areia (Tabela 3 da NBR 6120-ANEXO C) | $\gamma_t = 17 \text{ kN/m}^3$ |
| Espaçamento entre os Gigantes | $d = 2,0\text{m}$ |

7.3. Carregamentos e esforços

As ações decorrentes dos empuxos nas estruturas de edificações são consideradas pela NBR 6120/90 como de Ações Permanentes.

Devido os valores do peso próprio da estrutura ser infinitamente menores que as cargas horizontais atuantes, as mesmas foram desprezadas.

7.3.1. Cálculo das solicitações

De acordo com Antonio Moliter (1980, pg. 13), no caso de terreno sem sobrecarga, temos as fórmulas abaixo para cálculo:

a) Grandeza do empuxo $E = \frac{1}{2} \cdot K \cdot \gamma_t \cdot h^2$ (kN/m) (Eq. 22)

b) Ponto de aplicação $y = \frac{h_1}{3}$ (m) (Eq. 23)

c) Pressão na base $p = K \cdot \gamma_t \cdot h$ (kPa) (Eq. 24)

Onde

E → Empuxo de terra

K → Coeficiente de empuxo ou de Coulomb

γ_t → Peso específico aparente do material

h → Altura total do talude

Adotando o coeficiente de majoração de carga $\gamma_f=1,5$, conforme a tabela 1 terão os valores das equações (Eq. 16), (Eq. 17) e (Eq. 18) multiplicados por este coeficiente.

Tabela 1 - Valores típicos de Fator de segurança

| Grau de segurança necessário ao local | Métodos baseados no equilíbrio-limite | Tensão-deformação |
|---------------------------------------|---------------------------------------|--|
| | Padrão: fator de segurança mínimo* | Padrão: deslocamento máximo |
| alto | 1,50 | Os deslocamentos máximos devem ser compatíveis com o grau de segurança necessário ao local, à sensibilidade de construções vizinhas e à geometria do talude. Os valores assim calculados devem ser justificados. |
| médio | 1,30 | |
| baixo | 1,15 | |

* Podem ser adotados fatores diferentes, desde que justificados.

FONTE: 23 - NBR 11682:2009 - Estabilidade de encostas

Determinação do coeficiente de Coulomb k

Segundo Antonio Moliter (1980, pg. 12), para paramento interno *liso, vertical e terreno adjacente horizontal*, K é dado pela fórmula:

$$K = tg^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (\text{Eq. 25})$$

Onde,

$\varphi \rightarrow \hat{\text{Ângulo de talude natural}}$

Conforme a Tabela 3 da NBR 6120 (ANEXO C), o ângulo do talude natural da areia, como é o caso, é $\varphi = 30^\circ$.

Fazendo $\varphi = 30^\circ$ na (Eq. 25), obtemos o valor do Coeficiente de Coulomb para a areia:

$$K = tg^2 \left(45^\circ - \frac{30^\circ}{2} \right) = tg^2 (30^\circ)$$

$$K = \left(\frac{\sqrt{3}}{3} \right)^2 = \frac{1}{3}$$

Determinação do empuxo de terra E para 1,0m linear de cortina

Substituindo os valores de $K = \frac{1}{3}$, $\gamma_t = 17kN/m^3$ e $h = 3,5 m$ e multiplicando pelo coeficiente de majoração γ_f na (Eq. 22), determinamos o valor do Empuxo E,

$$E = \frac{1}{2} \cdot K \cdot \gamma \cdot h^2 \cdot \gamma_f$$

$$E = \frac{1}{2} \times \frac{1}{3} \times 17 \times 3,5^2 \times 1,5$$

$$\mathbf{E = 52,06 kN/m}$$

Determinação da pressão p na base da cortina

Substituindo os valores de $K = \frac{1}{3}$, $\gamma_t = 17kN/m^3$ e $h = 3,5 m$ e multiplicando pelo coeficiente de majoração $\gamma_f = 1,5$ na (Eq. 24), determinamos o valor da pressão p.

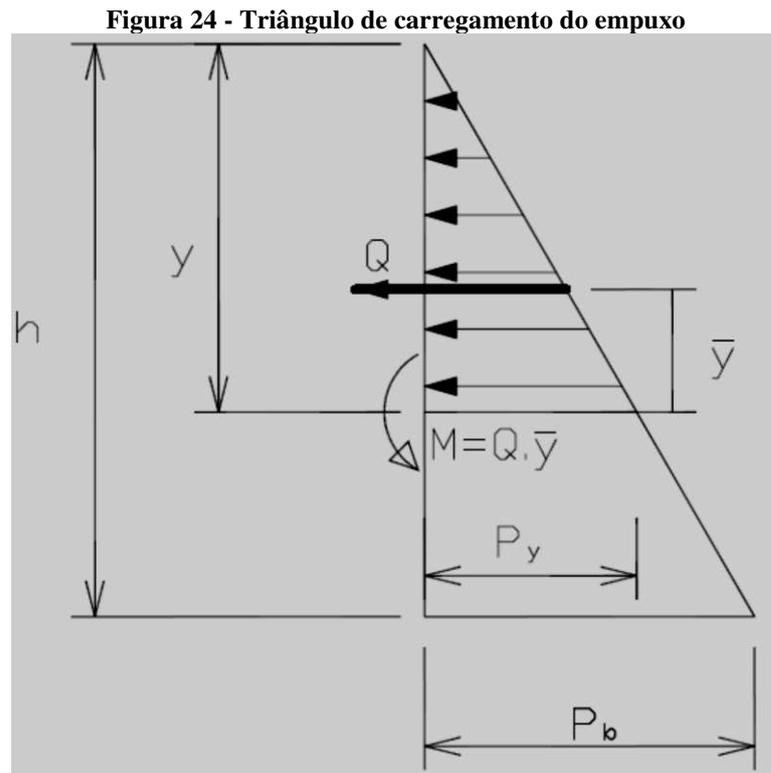
$$p = K \cdot \gamma_t \cdot h \cdot \gamma_f$$

$$p = \frac{1}{3} \cdot 17 \cdot 3,5 \cdot 1,5$$

$$\mathbf{p = 29,75 kPa}$$

Fórmulas para determinação dos valores do carregamento q , Esforços cortante V e dos Momentos em função da altura y e para 2,0m de largura de cortina.

A partir da figura 24 e do distanciamento entre os gigantes $d=2,0\text{m}$, deduzimos as fórmulas abaixo em função da altura.



- a) **Carregamento $p(y)$** : para determinação do valor da pressão em função da altura, aplicamos os conhecimentos de semelhança de triângulo, conforme abaixo,

$$\frac{p_y}{p_h} = \frac{y}{h}$$

$$p_y = \frac{y}{h} p_h$$

$$p_y = \frac{p_b}{h} y \quad (\text{Eq. 26})$$

Substituindo os valores $p_b=29,75\text{kPa}$ e $h=3,5\text{m}$, na Eq. 26, obtemos,

$$p_y = \frac{29,75}{3,5} y \Rightarrow$$

$$p_y = 8,5 y \quad (\text{Eq. 27})$$

A carga total da faixa de terra incidente sobre cada gigante é obtida pelo produto da distância d entre cada peça e a carga unitária da pressão p_y . Logo,

$$q_y = d \cdot p_y$$

$$q_y = d \cdot 8,5 y$$

$$q_y = 17,0 y \quad (\text{Eq. 28})$$

- b) **Da carga resultante $E(y)$:** O valor da carga atuante em cada gigante pode ser colocado em função do valor da carga q_y e a altura y conforme a equação abaixo:

$$E = \frac{1}{2} \cdot p_y \cdot y \quad (\text{Eq. 29})$$

- c) **Do Momento $M(y)$:** este valor pode ser colocado em função do valor da carga q_y e a altura y conforme a equação abaixo:

$$M = E \cdot \bar{y}$$

$$M = \left(q_y \cdot \frac{y}{2} \right) \cdot \frac{y}{3}$$

$$M = q_y \cdot \frac{y^2}{6} \quad (\text{Eq. 30})$$

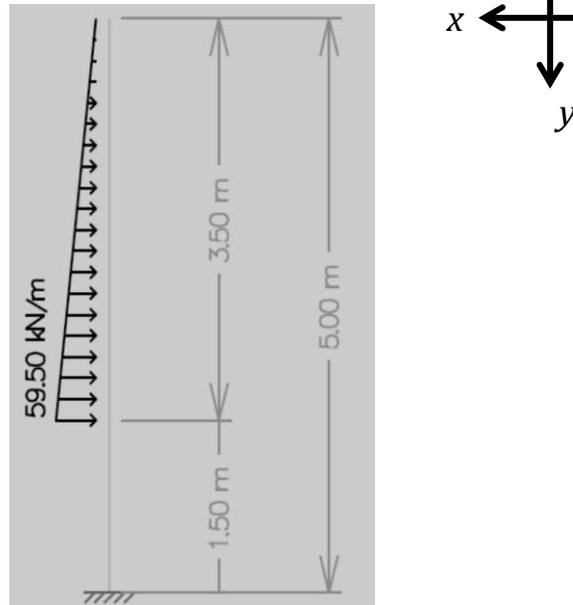
- d) **Ponto de inflexão:** De acordo com estudioso do assunto, nos terrenos siltoarenoso, como é o caso, o ponto de inflexão de uma estaca livre no topo e submetida a um esforço horizontal se dá a uma profundidade $h_i=1,50\text{m}$ do solo, valor este que será adotado sem maiores considerações:

$$d_i = 1,50 \text{ m}$$

Utilizando o software Ftool, disponibilizada pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), demonstramos o Carregamento, Esforços e Momentos resultantes em função da altura e para a faixa de 2,0m de aterro, que é incidente sobre cada gigante, conforme abaixo:

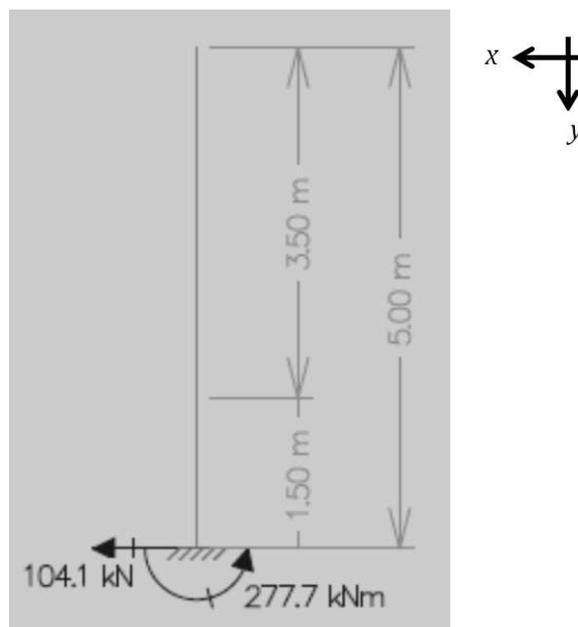
Carregamento: Verifica-se o carregamento máximo a 3,50m a partir do topo da cortina.

Figura 25 - Carregamento



Forças e Momentos Resultantes: O valor do carregamento triangular é transferido para o ponto de inflexão D assim como o Momento.

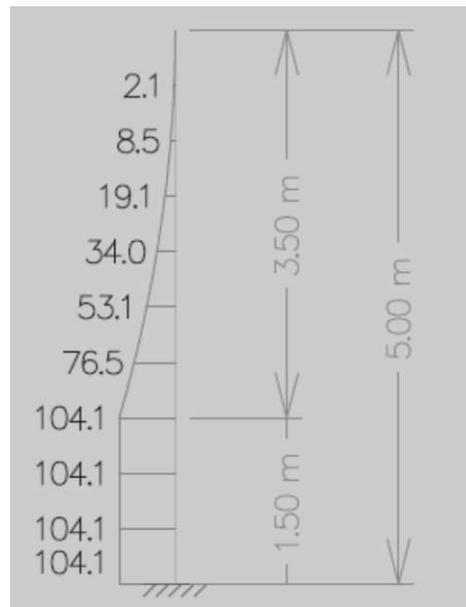
Figura 26 - Força e Momento Resultantes



ESFORÇOS SOLICITANTES

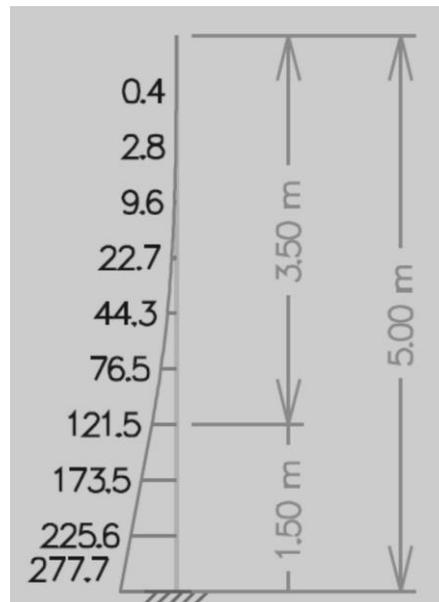
Esforço Cortante (kN) : Valores do esforço cortante a cada 0,50m.

Figura 27 - Esforço cortante



Momento fletor (kN.m): Valores do momento fletor a cada 0,50m.

Figura 28 - Momento fletor



Quadro Resumo

Quadro 1 - Resumo dos valores a cada 0,5m

| h (m) | p (kPa) | d (m) | q (kN) | E (kN/m) | V (kN) | M (kN.m) |
|------------------|--------------------|------------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|
| 0,0 | 0,00 | 2 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,5 | 4,25 | 2 | 8,50 | 1,06 | 2,13 | 0,35 |
| 1,0 | 8,50 | 2 | 17,00 | 4,25 | 8,50 | 2,83 |
| 1,5 | 12,75 | 2 | 25,50 | 9,56 | 19,13 | 9,56 |
| 2,0 | 17,00 | 2 | 34,00 | 17,00 | 34,00 | 22,67 |
| 2,5 | 21,25 | 2 | 42,50 | 26,56 | 53,13 | 44,27 |
| 3,0 | 25,50 | 2 | 51,00 | 38,25 | 76,50 | 76,50 |
| 3,5 | 29,75 | 2 | 59,50 | 52,06 | 104,13 | 121,48 |
| 4,0 | 34,00 | 0 | 0,00 | 68,00 | 104,13 | 173,54 |
| 4,5 | 38,25 | 0 | 0,00 | 86,06 | 104,13 | 225,60 |
| 5,0 | 42,50 | 0 | 0,00 | 106,25 | 104,13 | 277,67 |

7.3.2. Dimensionamento do gigante

Modelo Estrutural

- A cortina elástica nervurada será constituída de placas de concreto armado até a altura do aterro e serão engastadas por continuidade sobre gigantes que funcionarão como vigas verticais.

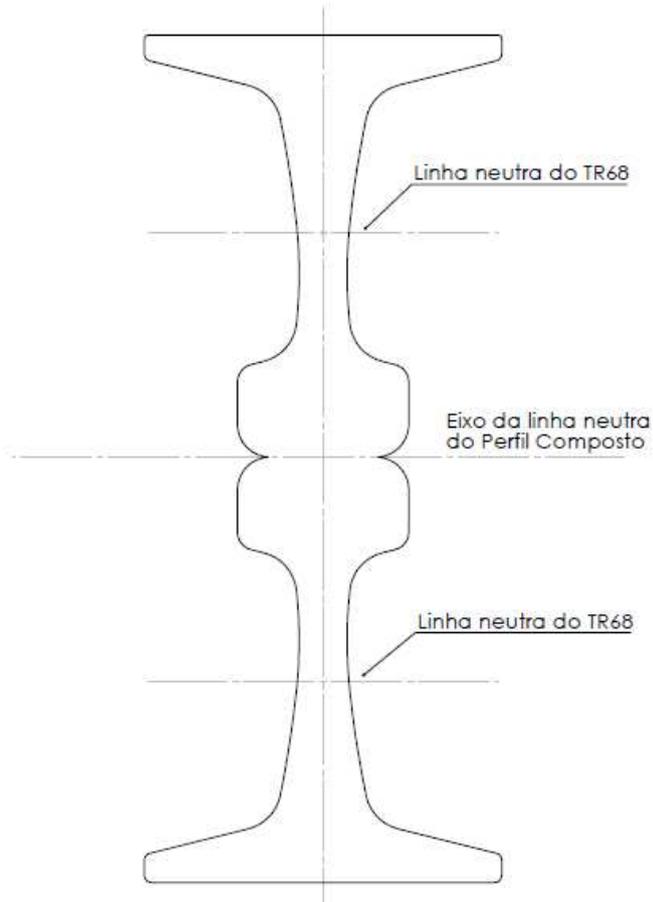
- Os esforços suportados pelas placas de concreto serão transferidos aos gigantes metálicos, os quais transferirão ao solo, uma vez que estarão cravados no mínimo 11,0m (onze metros) de profundidade.

- Os gigantes serão cravados na vertical paralelamente a uma distancia entre si de 2,0m e, ligados entre si por placas de concreto armado.

a) Seção transversal do gigante

Os gigantes serão constituídos de perfil metálicos compostos de 02 trilhos tipo TR68, unidos por solda na região do boleto conforme figura abaixo.

Figura 29 - Seção transversal do perfil soldado



FONTE: 24- Própria

- a) Cálculo do momento de inércia do gigante ao centro de gravidade.

Utilizando os dados do perfil TR68 da tabela 4, cálculo de inércia de seção composta e o teorema dos eixos paralelos, temos que:

$$I_x = (\bar{I}_{x1} + A_1 \cdot d_y^2) + (\bar{I}_{x2} + A_2 \cdot d_y^2)$$

Como $\bar{I}_{x1} = \bar{I}_{x2}$, temos:

$$I_x = 2 \cdot (\bar{I}_{x1} + A_1 \cdot d_y^2)$$

Onde,

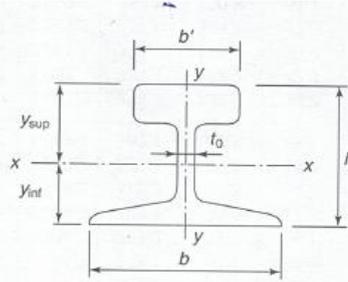
$I_x \rightarrow$ É o momento de inércia do perfil composto

$\bar{I}_{x1} = \bar{I}_{x2} \rightarrow$ É o momento de inércia do trilho TR68

$A_1 = A_2 \rightarrow$ É a área da seção transversal do trilho TR68

$d_{y1} = d_{y2} \rightarrow$ É a distância do eixo de inércia de um trilho para o eixo de inércia do perfil composto.

Tabela 2 - Dado dos trilhos ferroviários



| Tipo | | Dimensões | | | | Massa por Metro | Área A | | | | | | | |
|-------------------|-----------------|-----------|-------|------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|
| Nacional (C.S.N.) | Americano | h | b | b' | t ₀ | | | I _x | y _{sup} | W _{sup} | y _{ref} | W _{inf} | i _x | I _y |
| | | mm | mm | mm | mm | kg/m | cm ² | cm ⁴ | cm | cm ³ | cm | cm ³ | cm | cm ⁴ |
| TR — 25 | A.S.C.E. 5040 | 98,4 | 98,4 | 54,0 | 11,1 | 25 | 31,5 | 413 | 5,07 | 81,5 | 4,77 | 86,6 | 3,62 | 110 |
| TR — 32 | A.S.C.E. 6540 | 112,7 | 112,7 | 61,1 | 12,7 | 32 | 40,8 | 702 | 5,84 | 120,2 | 5,43 | 129,3 | 4,15 | 204 |
| TR — 37 | A.S.C.E. 7540 | 122,2 | 122,2 | 62,7 | 13,5 | 37 | 47,3 | 951 | 6,38 | 149,1 | 5,84 | 162,8 | 4,48 | 269 |
| TR — 45 | A.R.E.A. 90RA-A | 142,9 | 130,2 | 65,1 | 14,3 | 45 | 56,9 | 1605 | 7,84 | 204,7 | 6,45 | 248,8 | 5,31 | 368 |
| TR — 50 | A.R.E.A. 100RE | 152,4 | 136,5 | 68,2 | 14,3 | 50 | 64,2 | 2037 | 8,26 | 246,6 | 6,98 | 291,8 | 5,63 | 456 |
| TR — 57 | A.R.E.A. 115RE | 168,3 | 139,7 | 69,0 | 15,9 | 57 | 72,5 | 2735 | 9,26 | 295,4 | 7,57 | 361,3 | 6,14 | 511 |
| TR — 68 | A.R.E.A. 136RE | 185,7 | 152,4 | 74,6 | 17,5 | 68 | 86,1 | 3950 | 10,08 | 391,7 | 8,52 | 463,8 | 6,77 | |

FONTE: 25 - Pfeil, Walter (2015)

Utilizando a o quadro 2 abaixo, calculamos o valor de I_x .

Quadro 2 - Cálculo do momento de inércia

| I | \bar{I}_x | A | d _y | Σ (cm ⁴) |
|----------------|-------------|------|--------------------|-----------------------------|
| I ₁ | 3950 | 86,1 | 10,08 | 12.698,31 |
| I ₂ | 3950 | 86,1 | 10,08 | 12.698,31 |
| | | | I _{total} | 25.396,62 |

Logo, a Inércia I_x do perfil composto de 2TR68 é de:

$$I_x = 25.396,62 \text{ cm}^4$$

b) Cálculo do módulo de resistência do gigante: Consideramos o módulo de resistência W de uma área como sendo a razão entre a Inércia em relação ao centro de gravidade desta seção e distância c da linha neutra até face da área, conforme abaixo:

$$\mathcal{W} = \frac{I_x}{c} \quad (\text{Eq. 31})$$

Onde,

$$c = \frac{h}{2} \quad (\text{Eq. 32})$$

Conhecendo a altura total $d=37,14$ cm da seção composta conforme a figura 17, e substituindo na (Eq. 25), temos.

$$c = \frac{37,14}{2} = \mathbf{18,57 \text{ cm}}$$

Substituindo os valores de $I_x=25.396,62\text{cm}^4$ e $c=18,57\text{cm}$ na equação (Eq.32), encontramos o valor de W ,

$$\mathcal{W} = \frac{25.396,62}{18,57}$$

$$W = 1.368 \text{ cm}^3 \quad \leftrightarrow \quad W = 1,368 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

c) Cálculo da tensão de serviço $\sigma_{m\acute{a}x}$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M}{W} \quad (\text{Eq. 33})$$

Considerando o valor máximo para o momento fletor $M = 277,67$ kN.m encontrado na Quadro 1 e o valor do módulo de resistência $W = 1,368 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, para o perfil composto e substituindo na (Eq. 26), temos,

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{277,67 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}}{1,368 \times 10^{-3} \text{ m}^3}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 202.975.146,20 \text{ Pa} \quad \Leftrightarrow \quad \sigma_{m\acute{a}x} = 202,98 \text{ MPa}$$

Logo, a máxima tensão a que o material do perfil composto estará submetido será de,

$$\sigma_{m\acute{a}x} \cong \mathbf{203,0 \text{ Mpa.}}$$

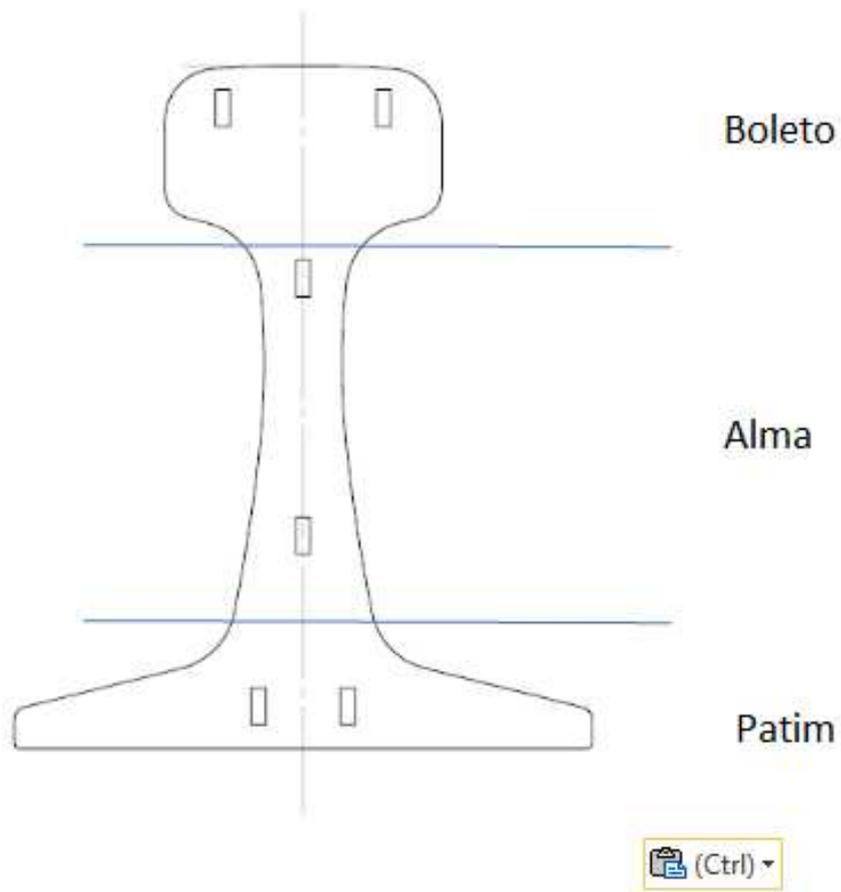
8. ENSAIOS

Para determinação da resistência f_u do material que compõe as sucatas de trilho foram executados ensaios de tração conforme norma ASTM E8/EM8.

8.1. Corpo de prova

Foram retiradas de 06 (seis) corpos de prova reduzidos da seção transversal da amostra de um trilho, conforme figura 28 abaixo.

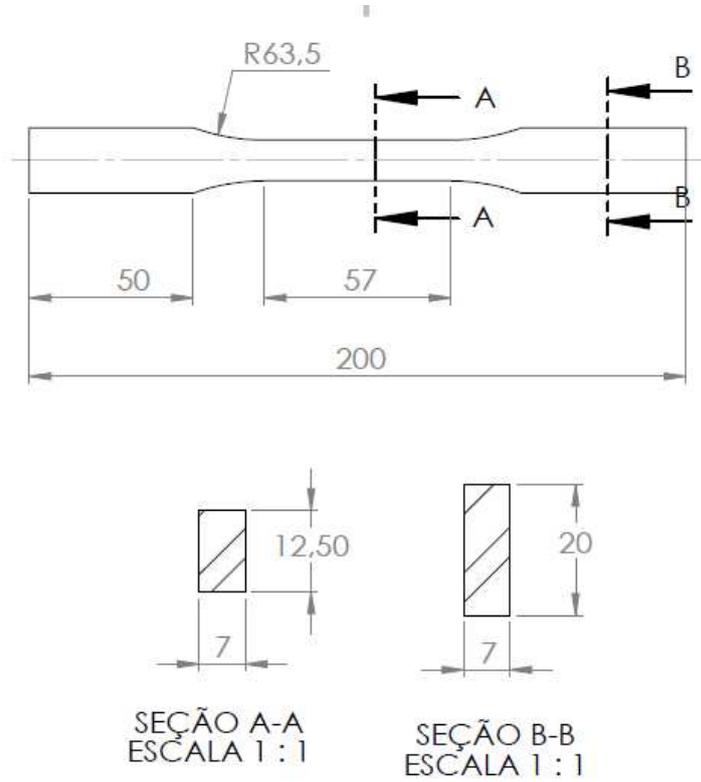
Figura 30 - Local de extração das amostras



FONTE: 26- Própria

Os corpos de prova foram fabricados de acordo com as dimensões da figura 31.

Figura 31 - Dimensões do corpo de prova



FONTE: 27 – Própria

Figura 32 - Processo de fabricação de corpo de prova reduzido



FONTE: 28 - Própria

Figura 33 - Fotos dos corpos de prova produzidos



FONTE: 29 - Própria

8.2. Os ensaios

Os ensaios de tração foram executados no Laboratório do Núcleo Tecnológico de Engenharia (NUTENGE) da UEMA, em máquina de ensaio universal EMIC DL10000 com capacidade máxima de ensaio de 100kN (Figura 34).

Figura 34 - Máquina universal de ensaio Emic DL 10000



FONTE: 30- Própria

Os corpos de prova foram submetidos a esforço de tração até a capacidade máxima de 95kN. Os relatórios dos ensaios foram gerados pelo software Tesc. versão 3.05. e encontram-se em (ANEXO B).

Figura 35 - Ensaio de tração em corpo de prova



FONTE: 31 - Própria

8.3. Resultados

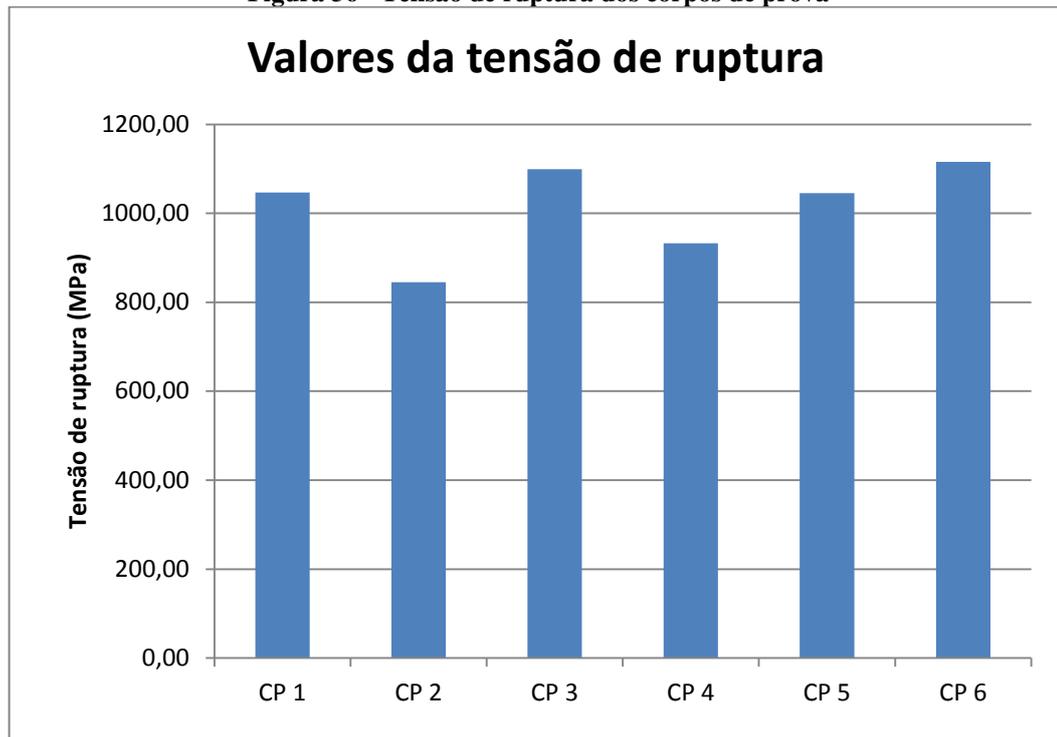
Os resultados obtidos em laboratórios encontram-se listados na tabela 6 abaixo.

Tabela 3 - Resultado dos ensaios de tração em corpos de prova

| CORPO DE PROVA | Trabalho nº | Largura (mm) | Espessura (mm) | Comprimento (mm) | Área (mm ²) | Força Máxima (N) | Tensão Máxima (MPa) | Alongamento (%) | Obs. |
|----------------|-------------|--------------|----------------|------------------|-------------------------|------------------|---------------------|-----------------|---|
| CP 1 | 0592 | 12,7 | 6,45 | 50 | 81,915 | 85775,67 | 1047,13 | 15,32 | Desconsiderado - escorregou na máquina |
| CP 2 | 0593 | 12,5 | 6,5 | 50 | 81,25 | 68665,24 | 845,11 | 8,81 | Aprovado |
| CP 3 | 0608 | 12,1 | 7,15 | 50 | 86,515 | 95116,36 | 1099,42 | 0 | Não rompeu - Força máxima da maq. excedida. |
| CP 4 | 0611 | 11,1 | 7,3 | 50 | 81,03 | 75547,19 | 932,34 | 11,59 | Aprovado |
| CP 5 | 0612 | 12,5 | 7,2 | 50 | 90 | 94118,38 | 1045,76 | 21,89 | Aprovado |
| CP 6 | 0613 | 12 | 7,1 | 50 | 85,2 | 95047,1 | 1115,58 | 0 | Não rompeu - Força máxima da maq. excedida. |

FONTE: 32 - Própria

Figura 36 - Tensão de ruptura dos corpos de prova



FONTE: 33- Própria

Considerações quanto aos ensaios realizados:

- **Corpo de prova 01** – Durante o ensaio de tração, o corpo de prova CP 01 escorregou, o que invalidou o ensaio.
- **Corpo de prova 02** – O ensaio de tração ocorreu dentro da normalidade.
- **Corpo de prova 03** – O corpo de prova CP 03 não chegou a romper, devido a máquina de tração ter atingido o limite máximo de $F=95116,36\text{N}$, o que impossibilitou a determinação do limite de ruptura f_u do material.
- **Corpo de prova 04** – O ensaio de tração ocorreu dentro da normalidade.
- **Corpo de prova 05** – O ensaio de tração ocorreu dentro da normalidade.
- **Corpo de prova 06** – O corpo de prova CP 03 não chegou a romper, devido a máquina de tração ter atingido o limite máximo de $F=95047,1\text{N}$, o que impossibilitou a determinação do limite de ruptura f_u do material.

Verificamos que os valores encontrados pelo ensaio são próximos aos valores obtidos por trabalhos semelhantes, (AVALIAÇÃO MECÂNICA E METALÚRGICA EM TRILHO FERROVIÁRIO UTILIZADO EM VIA CONTÍNUA, Macedo, M.L.K.; Silva, A. A. M.; Barlavento, M. A. e Reguly, A. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

De acordo como a norma da NBR 8681/2003, “salvo em exigência expressa em norma referente a determinado material ou tipo de construção, o valor representativo deve ser tomado como o da resistência *característica inferior*, sempre que a segurança dependa das porções menos resistentes do material da estrutura.”.

Para determinação da resistência de cálculo f_d é dada pela seguinte expressão:

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m} \quad (\text{Eq. 34})$$

Onde:

f_k é a resistência inferior

γ_m é o coeficiente de ponderação das resistências.

Considerando o valor de $\gamma_m = 1,35$ para o coeficiente de ponderação das resistências de acordo com a tabela 7 e o menor valor dos ensaios realizados, substituímos na (Eq. 27), para determinamos o valor da resistência de cálculo f_d do material:

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m} = \frac{845,11}{1,35}$$

$$f_d = 626,00 \text{ MPa}$$

Tabela 4 - Valores dos coeficientes de ponderação das resistências γ_m

| Combinações | Aço estrutural ^a | | Concreto γ_c | Aço das armaduras γ_s |
|----------------------------|--|--------------------------|------------------------|------------------------------------|
| | γ_a | | | |
| | Escoamento, flambagem e instabilidade γ_{a1} | Ruptura γ_{a2} | | |
| Normais | 1,10 | 1,35 | 1,40 | 1,15 |
| Especiais ou de construção | 1,10 | 1,35 | 1,20 | 1,15 |
| Excepcionais | 1,00 | 1,15 | 1,20 | 1,00 |

^a Inclui o aço de fôrma incorporada, usado nas lajes mistas de aço e concreto, de pinos e parafusos.

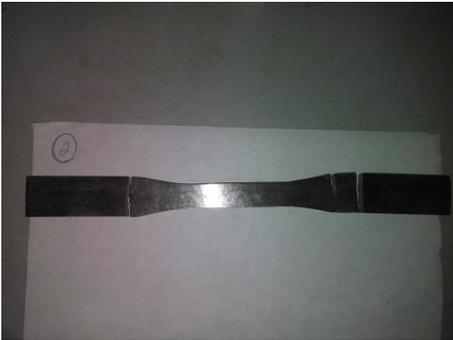
FONTE: 34 - (NBR 8800:2008)

Outra característica observada através da análise dos gráficos gerados e da fratura dos corpos de prova é quanto à natureza das amostras ensaiadas serem frágil, pois não

apresentaram limite de escoamento nítido. As fraturas ocorridas foram de forma abrupta, sem apresentarem deformação plástica apreciável antes da ruptura. O aspecto da superfície da fratura não apresentou uma zona fibrosa no centro do corpo de prova nem a de cisalhamento nas bordas denominada “cone”.

Logo, depreendemos que tais materiais **não** devem ser aplicados em elementos que serão submetidos a esforços de impacto.

Tabela 5 - Imagens de corpos de provas ensaiados

| CORPO DE PROVA | IMAGEM APÓS O ENSAIO | OBSERVAÇÕES |
|----------------|---|--|
| CP 01 |  | Corpo de prova escorregou na máquina de tração. Apertou-se novamente e reiniciamos os ensaios. |
| CP 02 |  | Corpo de prova com fratura fora do local reduzido. Possível causa: Desalinhamento da máquina. |
| CP 03 |  | Corpo de prova não rompido. Carga máxima do equipamento atingido. |

| CORPO DE PROVA | IMAGEM APÓS O ENSAIO | OBSERVAÇÕES |
|-----------------------|---|--|
| CP 04 |  | Corpo de prova rompido fora do local reduzido. |
| CP 05 |  | Corpo de prova rompido. Ensaio dentro das normalidades. |
| CP 06 |  | Corpo de prova não rompido. Carga máxima do equipamento atingido. |

9. RESULTADOS

9.1. Cálculos de dimensionamento dos perfis submetidos à flexão

De acordo com o carregamento e os esforços de flexão que os gigantes estarão submetidos, obtiveram-se os valores das tensões em função da altura da cortina conforme a tabela 9 abaixo.

Tabela 6- Tensão do perfil em função da altura

| h (m) | σ_{2TR68} (MPa) |
|------------------|--|
| 0,0 | 0,00 |
| 0,5 | 0,26 |
| 1,0 | 2,07 |
| 1,5 | 6,99 |
| 2,0 | 16,57 |
| 2,5 | 32,37 |
| 3,0 | 55,94 |
| 3,5 | 88,83 |
| 4,0 | 126,89 |
| 4,5 | 164,96 |
| 5,0 | 203,03 |

FONTE: 35 - Própria

Constatamos de acordo com a tabela 9 que a máxima tensão se dará a 5,0m abaixo do topo da cortina, $\sigma_{2TR68} = 203,0 \text{ MPa}$.

9.2. Ensaio de tração

De acordo com os resultados obtidos a partir da análise dos gráficos obtidos pelos ensaios de tração e as normas pertinentes ao assunto, determinou-se a resistência de cálculo do material $f_d = 626,0 \text{ MPa}$.

O material é de natureza frágil, devendo-se evitar a sua aplicação a esforços de impacto.

9.3. Comparação dos valores obtidos

Comparando-se os valores da tensão máxima de serviço dos gigantes da cortina obtida $\sigma_{m\acute{a}x} = 203,0 \text{ Mpa}$ e a tensão de cálculo do material $f_d = 626,0 \text{ MPa}$, determinamos o coeficiente de segurança efetivo γ_t que dever ser maior que 01 (um), conforme abaixo,

$$\gamma_t = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{f_d}$$

$$\gamma_t = \frac{626,0}{203}$$

$$\gamma_t = 3,08 > 1,00$$

Como verificado, a capacidade de carga do material é 3 vezes maior que a máxima tensão de serviço dos gigantes. Tal coeficiente dever ser mantido devido às incertezas quanto as reais dimensões dos trilhos removidas da ferrovia, que com certeza sofreram redução de suas dimensões e outras alterações de forma e composição, não sendo, portanto, padronizados.

10. CONCLUSÃO

Como foram verificadas, as sucatas de trilhos ferroviários podem ainda ser usados em outras estruturas após o seu descarte por parte da manutenção da ferrovia. Tal reutilização pode ser aplicada em elementos diferente das ferrovias. No entanto, para cada caso, deve se analisar previamente os esforços no qual serão submetidos e dimensionar os elementos que estes irão compor, de modo a garantir a estabilidade da estrutura, para que permaneça estável, e acima de tudo, garantindo a segurança de todos.

Verificamos que, de acordo com os cálculos das solicitações e o dimensionamento dos elementos compostos pelas sucatas de trilho, a viabilidade estrutural do perfil composto de 2TR68, como gigantes espaçados a cada 2,0m, para o caso de uma cortina elástica que combaterá de 3,50m de empuxo de terra.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6120: Ações e segurança nas estruturas** – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 11682: Estabilidade de encostas**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas** – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2003.

<<http://www.estruturas.ufpr.br/wp-content/uploads/resistencia/Apostila/Capitulo4.pdf>>
acesso em 22.05.2016

BEER, Ferdinand; JOHNSTON JR., E. Russell; DEWOLF, John; MAZUREK, F. David. **Mecânica dos Materiais**. Tradução de José B. Rubert. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.

CALLISTER JR., William D. **Ciência e engenharia dos materiais**: uma introdução. Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

DURAN, Jorge A. R. **Generalidades das falhas mecânicas por deformação e fratura**. Notas de aulas. Volta Redonda RJ.

GANGA, Gilberto M. D. **Trabalho de conclusão de curso (TCC) na engenharia de produção**: Um guia prático de conteúdo e forma. São Paulo: Atlas, 2012.

GARCIA, Amauri. **Ensaaios dos Materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

HIBBELER, Russell Charles. **Estática**: mecânica para engenharia. Tradução de Daniel Vieira. 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos Materiais**. Tradução de Arlete Simille Marques. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

MACEDO, M.L.K.; SILVA, A. A. M.; BARLAVENTO, M. A.; REGULY, A. **Avaliação mecânica e metalúrgica em trilho ferroviário utilizado em via contínua.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) / Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), Porto Alegre, 2001.

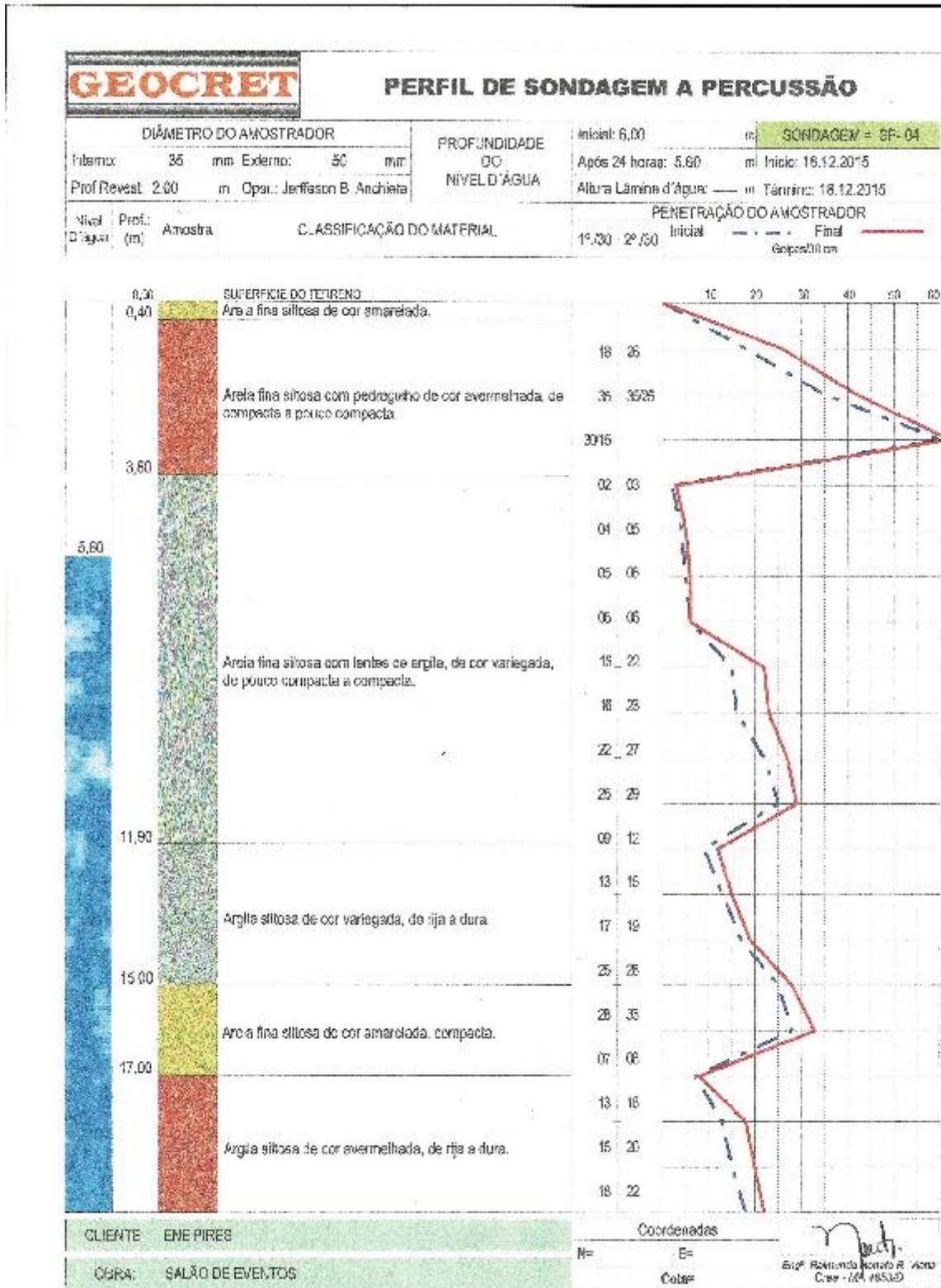
MERIAM, James L; KRAIGE, L. G. **Estática:** vol 1. Tradução de José Roberto Moraes d'Almeida. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MOLITERNO, Antonio. **Caderno de Muros de Arrimo.** São Paulo, 1980.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estrutura De Aço:** Dimensionamento prático de Acordo com a NBR 8800:2008. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

SOUZA, Sérgio A. **Ensaio mecânico de materiais metálicos:** fundamentos teóricos e práticos. 5. ed. São Paulo: Edgard Blüncher, 2000.

ANEXO A – SONDAAGEM GEOTÉCNICA



ANEXO C – CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS DE ARMAZENAGEM

Tabela 3 - Características dos materiais de armazenagem

| Material | | Peso específico aparente (kN/m ³) | Ângulo de atrito interno |
|---------------------------|---------------------------|--|--------------------------|
| 1 Materiais de construção | Areia com umidade natural | 17 | 30° |
| | Argila arenosa | 18 | 25° |
| | Cal em pó | 10 | 25° |
| | Cal em pedra | 10 | 45° |
| | Caliça | 13 | - |
| | Cimento | 14 | 25° |
| | Clinker de cimento | 15 | 30° |
| | Pedra britada | 18 | 40° |
| | Seixo | 19 | 30° |
| 2 Combustíveis | Carvão mineral (pó) | 7 | 25° |
| | Carvão vegetal | 4 | 45° |
| | Carvão em pedra | 8,5 | 30° |
| | Lenha | 5 | 45° |
| Material | | Peso específico aparente médio (kN/m ³) | Ângulo de atrito interno |
| 3 Produtos agrícolas | Açúcar | 7,5 | 35° |
| | Arroz com casca | 5,50 | 36° |
| | Aveia | 5 | 30° |
| | Batatas | 7,5 | 30° |
| | Café | 3,5 | - |
| | Centeio | 7 | 35° |
| | Cevada | 7 | 25° |
| | Farinha | 5 | 45° |
| | Feijão | 7,5 | 31° |
| | Feno prensado | 1,7 | - |
| | Frutas | 3,5 | - |
| | Fumo | 3,5 | 35° |
| | Milho | 7,5 | 27° |
| | Soja | 7 | 29° |
| Trigo | 7,8 | 27° | |