

Daniel Pinto Ferreira Wimmer

**Análise De Tensão
Em Elos de Correntes**

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA**

Programa de Graduação em
Engenharia Mecânica

**Rio de Janeiro
Junho de 2016**

Daniel Pinto Ferreira Wimmer

**Análise De Tensão
Em Elos de Correntes**

PROJETO DE GRADUAÇÃO

Projeto apresentado como requisito para obtenção de
grau de Bacharel pelo Programa de
Graduação em Engenharia Mecânica do
Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador

José Luiz de França Freire

Rio de Janeiro,

Junho de 2016

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. José Luiz de França Freire, e ao aluno de Doutorado, Vitor Eboli Lopes Paiva, primeiramente pela disponibilidade, incentivo e orientação desde o início do projeto e, também, pelos conselhos e teorias, sempre de grande ajuda.

Aos meus pais, Marta Pinto Ferreira Wimmer e Richard de Carvalho Wimmer, e ao meu avô, Aroldo Pinto Ferreira, que sempre me incentivaram, prezaram pelos estudos e se preocuparam comigo durante todo esse tempo.

Aos meus amigos do Laboratório de Fotoelasticidade, Cleber Cardozo, Jesus, Jorge e Felipe, que me fizeram seguir em frente, sempre me apoiando e ajudando no que eu precisasse.

Aos pessoal do ITUC, Luiz Paulo Barcellos de Assis Junior, Roberta Cristina e particularmente ao técnico Ubiratan Moreira Silva, pelo acompanhamento nos testes de ruptura das amostras de correntes.

Aos amigos de curso da PUC-Rio, que me apoiaram e fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida.

A Deus por ter me dado forças e coragem para continuar e concluir este meu sonho.

Daniel Pinto Ferreira Wimmer

Resumo

Esse projeto visa encontrar resultados de testes de ruptura em oito correntes de nove elos cada para comparar com resultados analíticos, numéricos e experimentais encontrados previamente.

Ao longo deste projeto procura-se explicar todo o procedimento de preparação para a realização dos testes.

Os resultados encontrados variam de 8,15 a 15,75 toneladas, com uma média de 11,07 toneladas e desvio padrão de 2,50 toneladas.

A partir deles, realizou-se uma análise estatística para provar a validade dessa teoria. Também, os elos fraturados foram analisados para descobrir características do material da corrente e possíveis resultados não esperados, como por exemplo, fratura em diferentes pontos do elo.

Palavras-chave: corrente, elo, análise de tensão, ponto crítico

Abstract

This project aims to find out results of tests of break of eight chains of nine links each to compare with analyticals, numerics and experimental results found previously.

Throughout this project, we try to explain all the procedures in preparation to perform tests.

The results found varies between 8,15 to 15,75 tons, with an average of 11, 07 tons and standard deviation of 2,50 tons.

From the results found, a statistical analysis is done to prove the validity of this theory. It's also analyzed the broken links to find out characteristics of the chain material and possible unexpected results, such as fracture at different points of the link.

Keywords: chain, link, stress analysis, critical point

Índice

| | |
|---|----|
| 1. Introdução..... | 9 |
| 2. Análise de tensões nos Elos de Corrente..... | 11 |
| 3. Método experimental..... | 28 |
| 3.1. Material e equipamento utilizado | 28 |
| 3.2. Experiência | 31 |
| 4. Resultados | 35 |
| 4.1. Coleta de dados..... | 35 |
| 4.2. Resultados e Discussão..... | 42 |
| 4.2.1. Análise estatística | 42 |
| 4.2.2. Análise da fratura | 44 |
| 4.2.3. Análise dimensional do elo | 45 |
| 5. Conclusão | 46 |
| 6. Referências Bibliográficas | 47 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 - Ancoragem de um barco com o uso de corrente. | 9 |
| Figura 2.1 - Um quadrante de elo [2]. | 11 |
| Figura 2.2 - Contato entre dois elos: (a) em um único ponto, (b) em uma área [2]. | 12 |
| Figura 2.3 - Distribuição de esforços no elo [2]. | 13 |
| Figura 2.4 - Geometria do modelo de elementos finitos [1]. | 16 |
| Figura 2.5 - Dimensões [mm] do elo [1]. | 17 |
| Figura 2.6 - Curva tensão x deformação real utilizada no modelo [1]. | 18 |
| Figura 2.7 - Malha de elementos finitos utilizada na simulação [1]. | 20 |
| Figura 2.8 - Distribuição de tensões circunferenciais ao longo do elo [2]. | 22 |
| Figura 2.9 - Distribuição de tensões equivalentes [MPa] no Elo 1 durante o passo 1 [1]. | 23 |
| Figura 2.10 - Distribuição de tensões na direção y [MPa] no Elo 1 durante o passo 1 [1]. | 24 |
| Figura 2.11 - Distribuição de tensões elásticas na direção y [MPa] no Caminho 1 [1]. | 24 |
| Figura 2.12 - Distribuição de tensões plásticas na direção y [MPa] no Caminho 1 [1]. | 25 |
| Figura 2.13 - Distribuição de tensões elásticas na direção y [MPa] no Caminho 2 [1]. | 26 |
| Figura 2.14 - Distribuição de tensões plásticas na direção y [MPa] no Caminho 2 [1]. | 26 |
| Figura 3.1 – Querosene. | 28 |
| Figura 3.2 - Escova de roupa. | 28 |
| Figura 3.3 – Estopa. | 29 |
| Figura 3.4 - Fita métrica. | 29 |
| Figura 3.5 - Esmerilhadeira de bancada. | 30 |
| Figura 3.6 - Paquímetro em mm. | 30 |
| Figura 3.7 - Caneta hidrográfica. | 30 |
| Figura 3.8 - Máquina de tração Amsler 20kN. | 31 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.9 - Vergalhão CA50A Guerdau. | 31 |
| Figura 3.10 - Limpeza da corrente. | 32 |
| Figura 3.11 - Corrente sendo cortada. | 33 |
| Figura 3.12 - Correntes prontas para os testes. | 33 |
| Figura 3.13 - Corrente momentos antes de início do teste. | 34 |
| Figura 4.1 - Medição da corrente inteira. | 36 |
| Figura 4.2 - Corrente 1 | 37 |
| Figura 4.3 - Curva tensão-deformação 1 | 37 |
| Figura 4.4 - Corrente 2 | 38 |
| Figura 4.5 - Curva tensão-deformação 2 | 38 |
| Figura 4.6 - Corrente 3 | 38 |
| Figura 4.7 - Curva tensão-deformação 3 | 39 |
| Figura 4.8 - Corrente 4 | 39 |
| Figura 4.9 - Curva tensão-deformação 4 | 39 |
| Figura 4.10 - Corrente 5 | 40 |
| Figura 4.11 - Curva tensão-deformação 5 | 40 |
| Figura 4.12 - Corrente 6 | 40 |
| Figura 4.13 - Curva tensão-deformação 6 | 41 |
| Figura 4.14 - Corrente 7 | 41 |
| Figura 4.15 - Curva tensão-deformação 7 | 41 |
| Figura 4.16 - Corrente 8 | 42 |
| Figura 4.17 - Curva tensão-deformação 8 | 42 |
| Figura 4.18 - Distribuição Normal. | 43 |
| Figura 4.19 - Fratura de um elo. | 45 |

Índice de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Parâmetros do modelo de EF [1]..... | 17 |
| Tabela 2 - Relação entre os carregamento aplicados na face livre do Elo 2 ao longo da simulação [1]. | 18 |
| Tabela 3 - Relação entre os carregamento aplicados na face livre do Elo 2 ao longo da simulação [1]. | 19 |
| Tabela 4 - Tensões circunferenciais no elo real, normalizadas em relação a $Q/f=1$ [1]. | 21 |
| Tabela 5 - Dimensões das correntes. | 35 |
| Tabela 6 - Resultados dos testes..... | 36 |
| Tabela 7 - Média e desvio padrão. | 43 |
| Tabela 8 - Testes realizados previamente | 44 |
| Tabela 9 - Média e desvio padrão das dimensões dos elos calculados | 45 |

1. Introdução

A corrente é um dos mais conhecidos, bem como um dos mais úteis dispositivos mecânicos. Correntes são universalmente empregadas em elevação e transporte de material, e para fixação e proteção de objetos móveis, como, por exemplo, em ancoragem de navios. Como regra, uma corrente é sujeita a esforços elevados sendo capaz de transmitir grandes forças.



Figura 1.1 - Ancoragem de um barco com o uso de corrente.

Neste trabalho, foram realizados oito testes de ruptura em oito correntes de nove elos cada e, a partir dos dados obtidos, foram feitas análises estatísticas pela curva t de Student e pela distribuição normal.

Esses resultados foram comparados com os valores analítico e numérico desenvolvidos no capítulo dois por Vitor Eboli Lopes Paiva [1] e com os três testes realizados anteriormente, afim de validar os experimentos realizados.

O valor numérico é a carga ideal para ruptura do elo da corrente, enquanto o analítico é carga mínima para seu rompimento.

Foi realizado, também, medição das dimensões do primeiro elo de cada corrente no intuito de observar se havia muita diferença entre eles e a possível influência dessas variações no resultado dos experimentos.

Por último, observou-se o elo fraturado, onde ocorreu a falha, para verificar sua fragilidade.

2. Análise de tensões nos Elos de Corrente

A análise é baseada na referência [1].

Para estudar a distribuição de tensões nos elos das correntes, foram utilizados em [1] dois meios de análise, uma analítica e outra numérica por elementos finitos. Um modelo complexo baseado em um estudo desenvolvido por Goodenough e Moore [2] e outro simples, baseado numa viga curva em forma de anel [3]. As não-linearidades geométricas do material e do contato foram consideradas em [1] pelo modelo de elementos finitos para simular a transferência de força entre dois elos. O software utilizado na análise numérica foi o ANSYS versão 15.0 [1].

O elo é dividido em quatro quadrantes como explicitado na figura abaixo [2]:

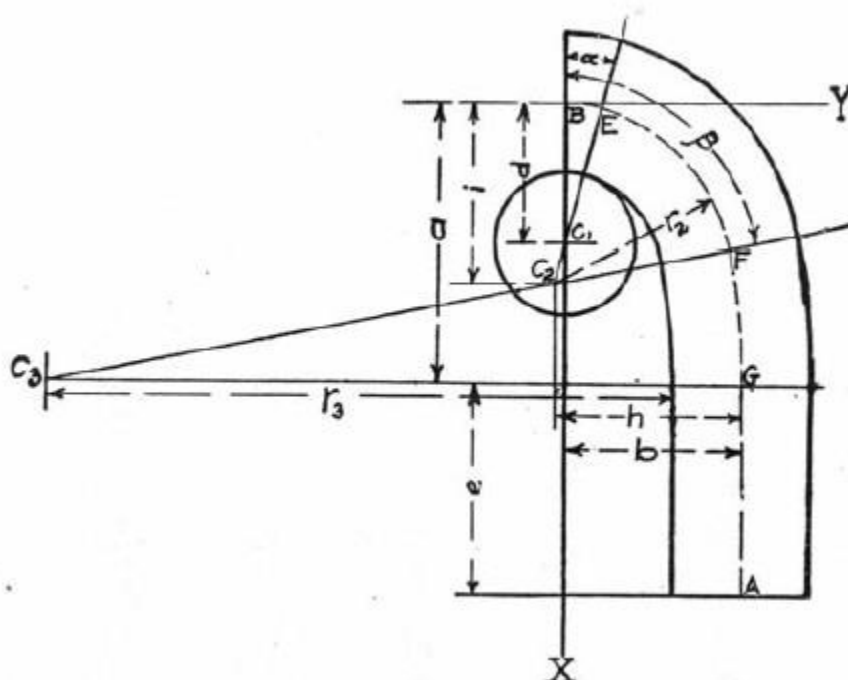


Figura 2.1 - Um quadrante de elo [2].

A linha central, BA, é composta de quatro partes: (1) o arco BE, que tem raio d com centro em C1; (2) o arco EF, que tem raio r_2 e centro C2; (3) o arco FG, com raio r_3 e centro C3; e uma seção reta GA de comprimento e .

A análise é simplificada assumindo que o contato entre dois elos ocorre em apenas um ponto e que, conseqüentemente, a pressão entre eles é concentrada neste ponto. Assim considerando que a força transmitida pelo elo inferior, Figura 2.2a, é igual a $2Q$, aparecera na seção A uma força igual a Q e um momento igual a M . No entanto outra hipótese considera que devido ao desgaste no contanto entre os elos a pressão é distribuída ao longo de um arco, EE, como mostrado na Figura 2.2b.

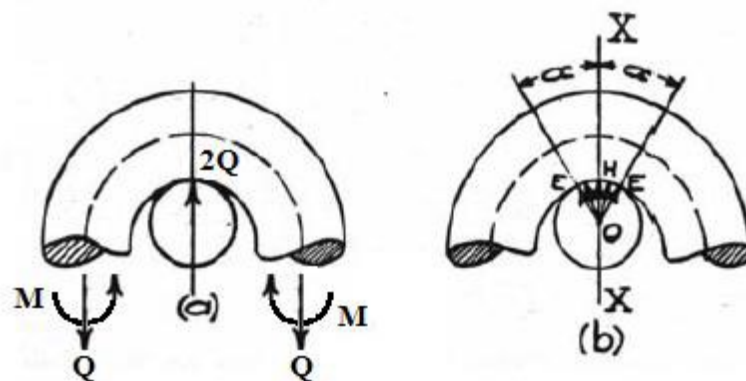


Figura 2.2 - Contato entre dois elos: (a) em um único ponto, (b) em uma área [2].

A pressão distribuída ao longo do ângulo de contato 2α dá origem a uma força normal, P , e um momento de flexão, M_b , independente da força Q e M momento na seção A, Figura 2.3.

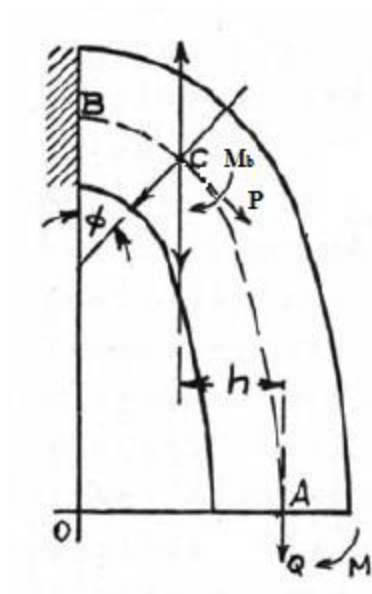


Figura 2.3 - Distribuição de esforços no elo [2].

No arco BE a força normal, P , e o momento fletor, M_b , são dados pelo sistema de equações

(1):

$$P = \frac{Q}{\text{sen}\alpha} - Q \cdot \text{cota}\alpha \cdot \cos\varphi \quad (1)$$

$$M_b = M + Qb - \frac{Qd}{\text{sen}\alpha} + Qd \cdot \text{cota}\alpha \cdot \cos\alpha$$

No arco EF a força normal, P , e o momento fletor, M_b , são dados pelo sistema de equações

(2):

$$P = Q \cdot \text{sen}\varphi \quad (2)$$

$$Mb = M + Qh - Qr_2 \cdot \text{sen}\varphi$$

No arco FG a força normal, P, e o momento fletor, Mb, são dados pelo sistema de equações (3):

$$P = Q \cdot \text{sen}\varphi \quad (3)$$

$$Mb = M + Qr_3 - Qr_3 \cdot \text{sen}\varphi$$

Na seção reta GA a força normal, P, e o momento fletor, Mb, são dados pelo sistema de equações (4):

$$P = Q \quad (4)$$

$$Mb = M$$

O momento M, na seção A, pode ser descrito segunda a equação (5):

$$M = -Qd \left[\frac{\alpha \frac{b}{d} \left(1 + \frac{1}{z_1}\right) - \frac{1}{z_1} \cdot \tan\alpha \cdot \text{sen}\alpha + \frac{h}{r_2} \left(1 + \frac{1}{z_2}\right) (\beta - \alpha) - \frac{1}{z_2} (\cos\alpha - \cos\beta) + \left(1 + \frac{1}{z_3}\right) \left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) - \frac{\cos\beta}{z_3}}{\alpha \left(1 + \frac{1}{z_1}\right) + \frac{d}{r_2} \left(1 + \frac{1}{z_2}\right) (\beta - \alpha) + \frac{d}{r_3} \left(1 + \frac{1}{z_3}\right) \left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) + 16 \frac{e}{d}} \right] \quad (5)$$

Onde a função z_i para um elo com seção transversal circular é dada pela equação (6):

$$z_i \approx \frac{1}{4} \left(\frac{d}{r_i} \right)^2 + \frac{1}{8} \left(\frac{d}{r_1} \right)^4 + \frac{5}{64} \left(\frac{d}{r_1} \right)^6 \quad (6)$$

A tensão circunferencial nas seções arqueadas do elo pela teoria de vigas curvas apresentada na referência [3], é dada pela equação (7):

$$\sigma_c = \frac{P}{f} + \frac{M_b(f - r_i f_m)}{f \cdot r_i ((r_i + y) \cdot f_m - f)} \quad (7)$$

Onde f é a área da seção transversal e f_m tem dimensão do comprimento e é definida pela relação (8):

$$f_m = \int \frac{df}{r} = 2\pi \left(r_i - \sqrt{r_i^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2} \right) \quad (8)$$

A análise por elementos finitos realizada por Vitor Eboli Lopes Paiva [1] considerou o Elo 1 com um comportamento elasto-plástico do material, enquanto o Elo 2 tem comportamento puramente elástico. Foi aplicado no Elo 2, na sua face livre no plano xz, diferentes carregamentos ao longo da simulação, de forma a simular os diferentes esforços a que a corrente é submetida (figura 2.9).

A Figura 2.4 apresenta a configuração geral do modelo. Usou-se um modelo de $\frac{1}{8}$ de simetria com restrições aos deslocamentos nas faces de simetria ($u_x = 0$ no plano yz, $u_z = 0$ no plano xy e $u_y = 0$ no plano xz (apenas no Elo 1)). A Figura 2.5 apresenta o elo com suas cotas dimensionais, tal como medida e apresentada na referência [1].

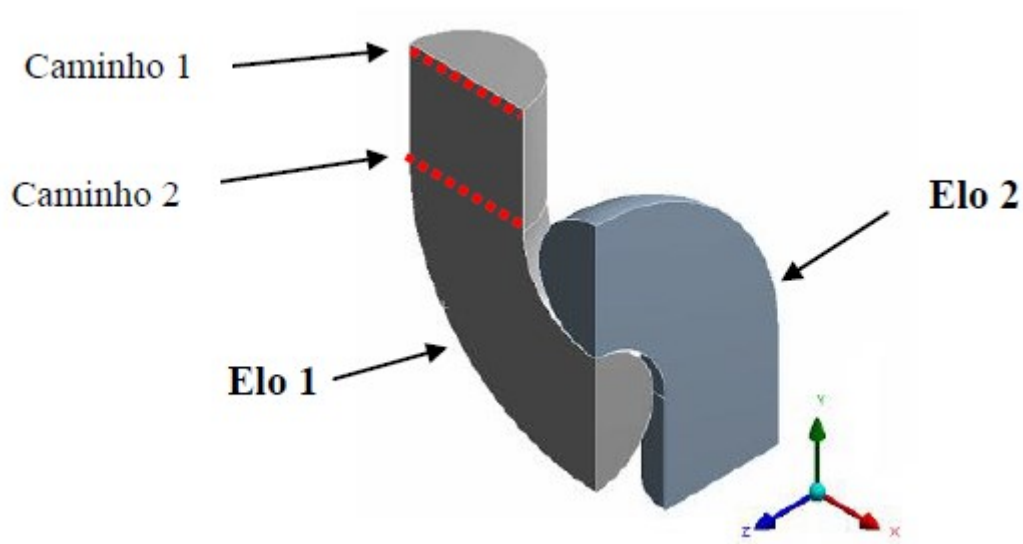


Figura 2.4 - Geometria do modelo de elementos finitos [1].

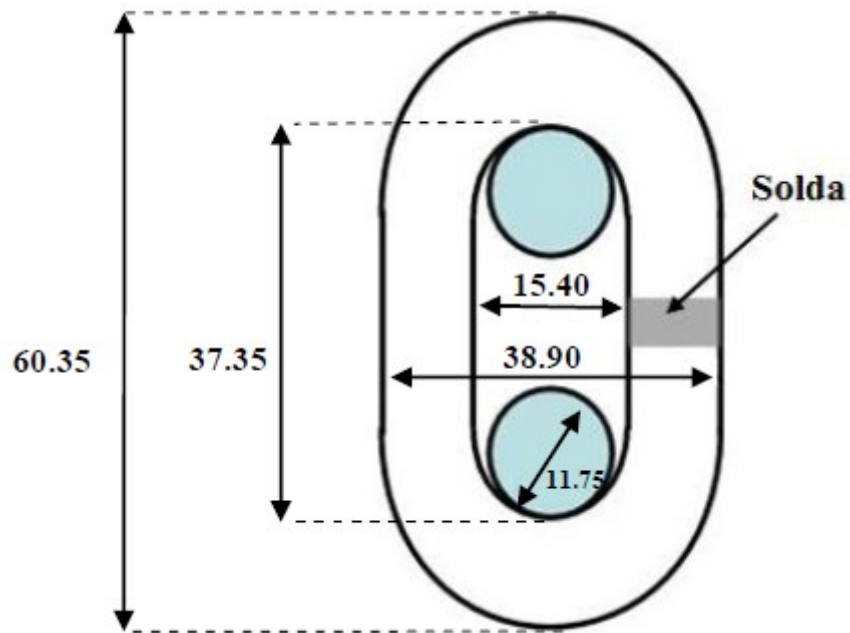


Figura 2.5 - Dimensões [mm] do elo [1].

O cálculo numérico para a determinação da distribuição de tensões no elo teve como base as informações fornecidas nas Tabelas 1 e 2 e Figura 2.6 [1].

Tabela 1 - Parâmetros do modelo de EF [1].

| | |
|---|----------------------------|
| Programa de Elementos Finitos | ANSYS 15 |
| Diâmetro da seção transversal do elo (d) (mm) | 11.75 |
| Número de passos de tempo | 9 |
| Número de nós | 49373 |
| Número de elementos | 10679 |
| Elementos utilizados | SOLID186/CONTA174/TARGE170 |

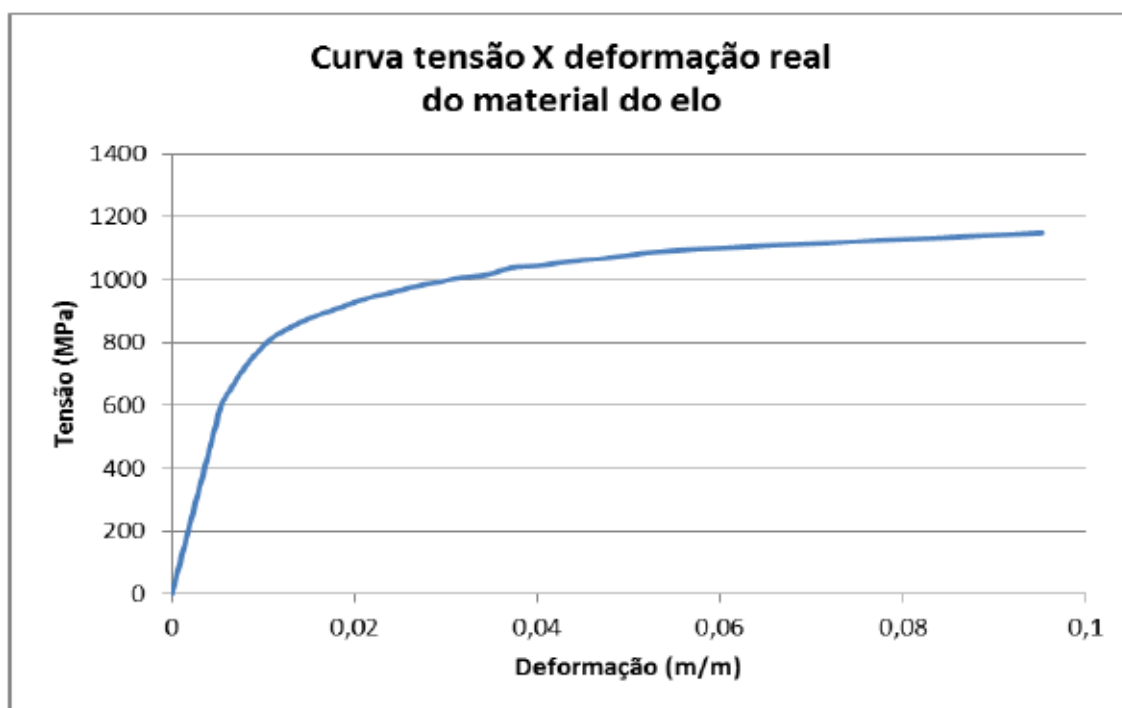


Figura 2.6 - Curva tensão x deformação real utilizada no modelo [1].

A Tabela 2 apresenta a relação de carregamentos aplicados ao longo do tempo no Elo 2. Esses esforços simulados provocam apenas tensões elásticas no Elo 1, enquanto a Tabela 3 apresenta a relação de carregamentos no Elo 2 que provocam deformações elásticas e plásticas no Elo1.

Tabela 2 - Relação entre os carregamento aplicados na face livre do Elo 2 ao longo da simulação [1].

| Passo de tempo | Esforço (MPa) |
|----------------|---------------|
| 1 | 10 |
| 2 | 20 |
| 3 | 50 |
| 4 | 100 |
| 5 | 150 |

Tabela 3 - Relação entre os carregamento aplicados na face livre do Elo 2 ao longo da simulação [1].

| Passo de tempo | Esforço (MPa) |
|----------------|---------------|
| 6 | 200 |
| 7 | 230 |
| 8 | 430 |
| 9 | 565 |

O autor da referência [1] escolheu o elemento sólido SOLID186, para a simulação dos elos da corrente. O elemento considera também o efeito da plasticidade e grandes deslocamentos.

O tipo de contato entre os elos foi definido como sendo FRICTIONLESS. Essa condição permite que as superfícies em contato possam deslizar uma sobre a outra livremente e o contato pode abrir e fechar de acordo com o carregamento, sem levar em consideração um coeficiente de atrito. As superfícies de contato entre os elos foram modeladas usando os elementos de contato rígido TARGE170 e CONTA174.

Na Figura 2.7, mostra-se a malha utilizada para a simulação, com refino no Elo 1.

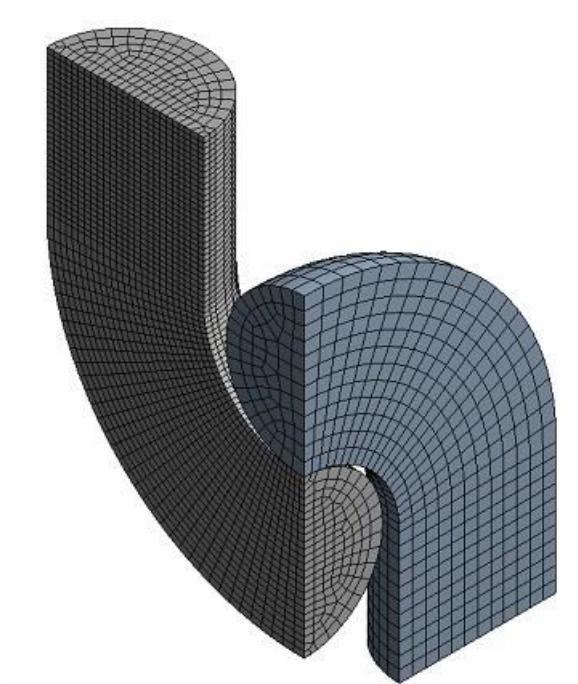


Figura 2.7 - Malha de elementos finitos utilizada na simulação [1].

A análise numérica tem por finalidade modelar o comportamento do material do Elo 1 durante aplicação de diferentes esforços que causam distribuições de tensões nos regimes elástico e elasto-plástico.

A não linearidade de uma estrutura pode obedecer a diversas razões que se classificam em quatro categorias:

- Não linearidade geométrica;
- Grandes deformações, grandes deslocamentos e grandes rotações;
- Não linearidade do material: plasticidade, hiperelasticidade, viscoelasticidade e fluência;
- Alterações de status: contato.

No problema em questão podem ocorrer os seguintes fenômenos não lineares: plasticidade e contato.

Utilizando as dimensões do elo real apresentadas na Figura 2.5 e as equações anteriormente desenvolvidas, calculou-se as tensões circunferenciais, que são apresentadas na Tabela 4. Os resultados foram normalizados em relação a $Q/f = 1 = \sigma_{nom}$, assim os K_t 's são calculados como, $K_t = \sigma_{calculado}/(Q/f)$ [1].

Tabela 4 - Tensões circunferenciais no elo real, normalizadas em relação a $Q/f=1$ [1].

| ϕ | K_t | | |
|------------------------------|---------------------------|--|--|
| | $y = 0$ | $y = +\frac{1}{2} d$ | $y = -\frac{1}{2} d$ |
| 0° | 0.67 | 4.07 | -6.58 |
| 10° | 0.68 | 3.89 | -6.20 |
| 20° | 0.70 | 3.40 | -5.05 |
| 30° | 0.71 | 2.32 | -2.73 |
| 40° | 0.71 | 1.25 | -0.43 |
| 50° | 0.71 | 0.32 | 1.56 |
| 60° | 0.71 | -0.44 | 3.17 |
| 70° | 0.71 | -0.99 | 4.36 |
| 80° | 0.71 | -1.33 | 5.09 |
| 90° | 0.94 | -1.30 | 3.66 |
| Seção reta | 1.00 | -1.47 | 3.47 |

A Figura 2.8 apresenta a distribuição de tensões ao longo do elo.

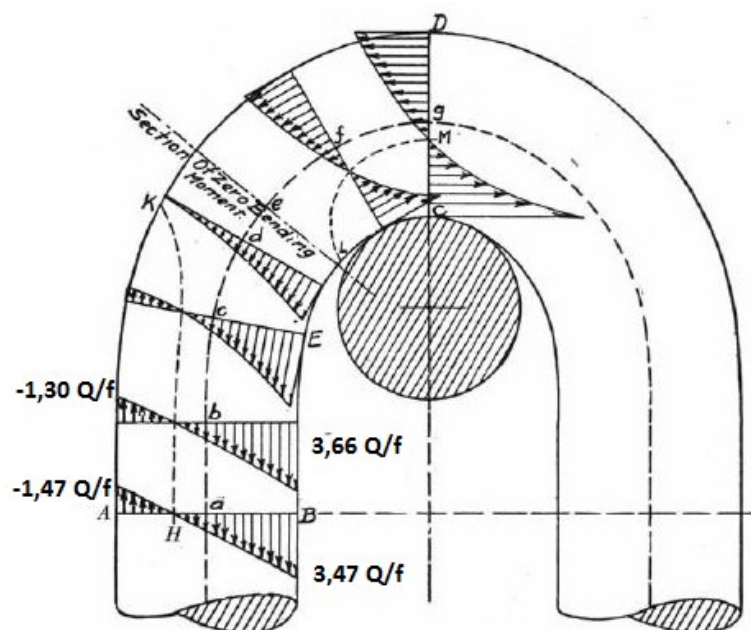


Figura 2.8 - Distribuição de tensões circunferenciais ao longo do elo [2].

A Figura 2.9 apresenta a distribuição das tensões equivalentes (von Mises) no Elo 1 durante o passo 1. Pode ser observado que o esforço transmitido pelo Elo 2 provoca no Elo 1 um carregamento de tração e flexão, com a linha neutra deslocada no sentido da superfície externa do elo, desconsiderando-se o comportamento das tensões na região de contato.

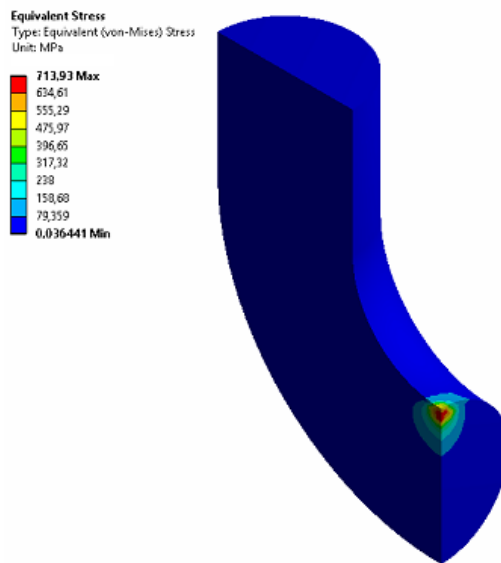


Figura 2.9 - Distribuição de tensões equivalentes [MPa] no Elo 1 durante o passo 1 [1].

A Figura 2.10 apresenta a distribuição das tensões na direção y no Elo 1 durante o passo 1. A maior tensão trativa, ponto de concentração de tensão, PKt, se encontra na superfície interna do elo, localizado na fronteira entre as diferentes geometrias do elo. Esse ponto de concentração de tensão tem valor igual a 3,43. Analisando a região reta do elo, no seu interior as tensões apresentam magnitudes trativas, enquanto no exterior as magnitudes são compressivas.

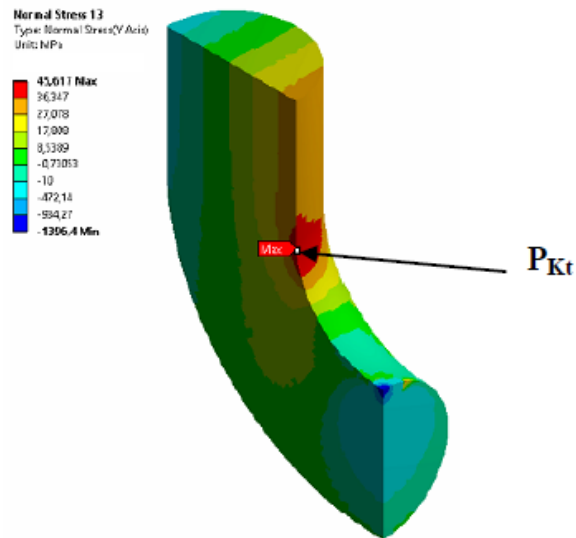


Figura 2.10 - Distribuição de tensões na direção y [MPa] no Elo 1 durante o passo 1 [1].

As Figuras 2.11 e 2.12 apresentam as distribuições de tensões nas regiões elásticas e plásticas na direção y ao longo do Caminho 1.

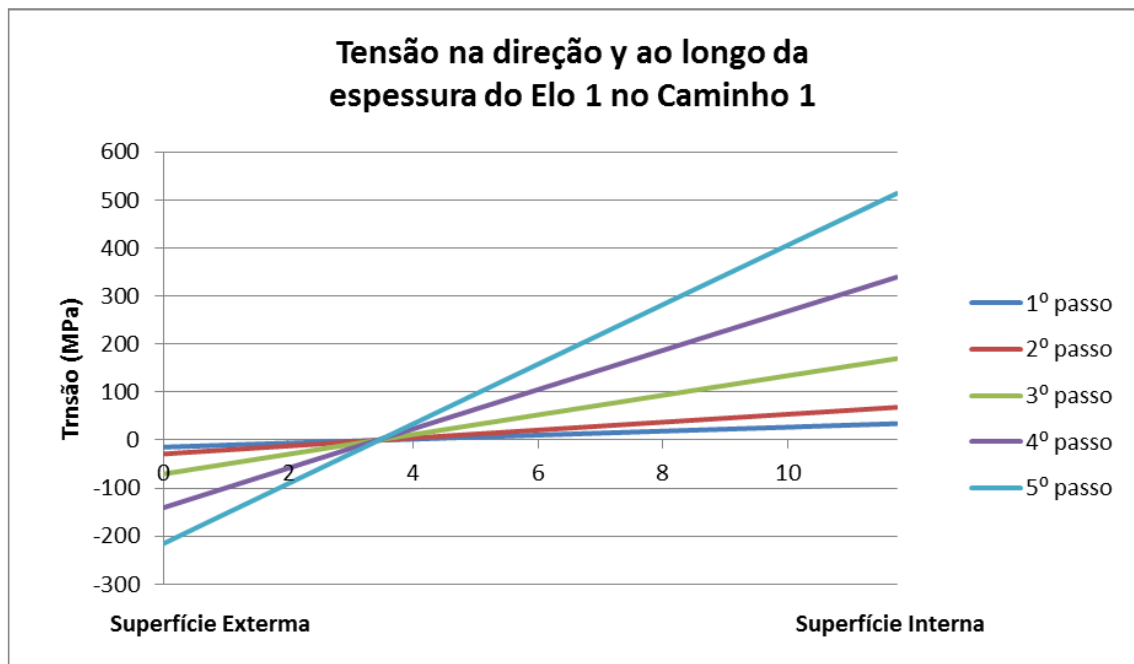


Figura 2.11 - Distribuição de tensões elásticas na direção y [MPa] no Caminho 1 [1].

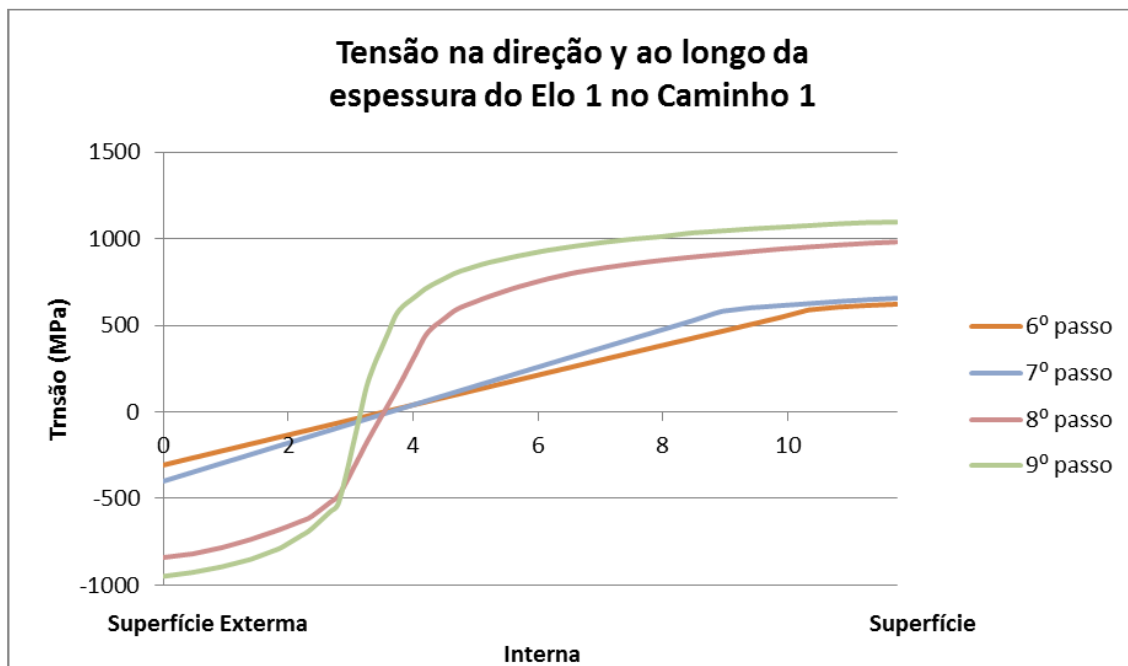


Figura 2.12 - Distribuição de tensões plásticas na direção y [MPa] no Caminho 1 [1].

As Figuras 2.13 e 2.14 apresentam as distribuições de tensões nas regiões elásticas e plásticas na direção y ao longo do Caminho 2.

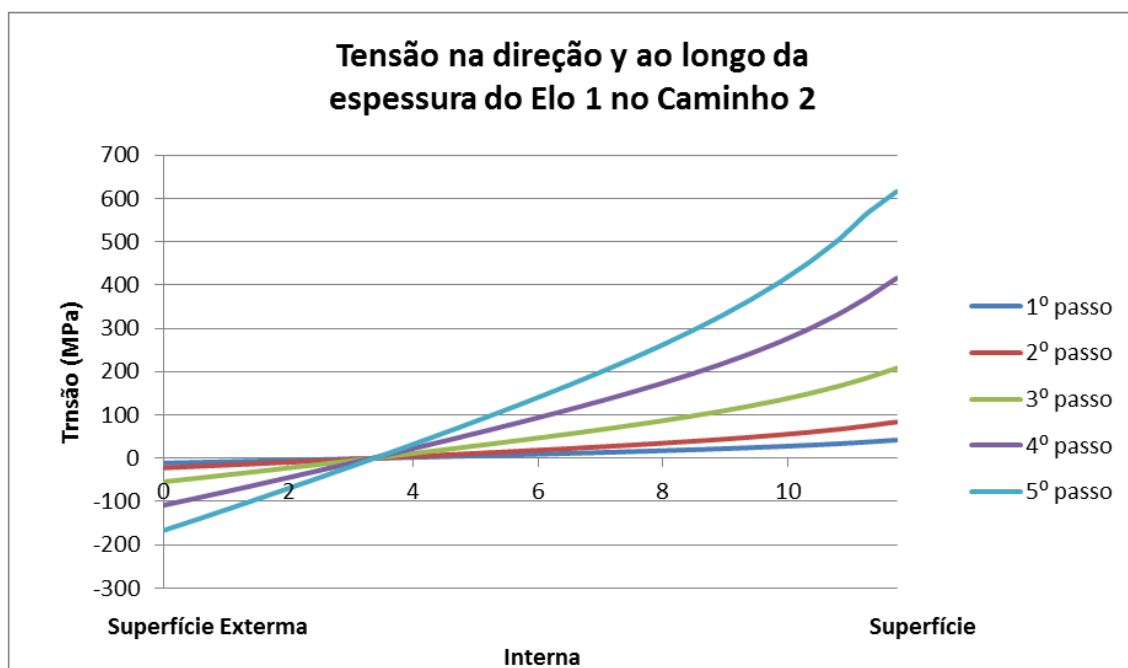


Figura 2.13 - Distribuição de tensões elásticas na direção y [MPa] no Caminho 2 [1].

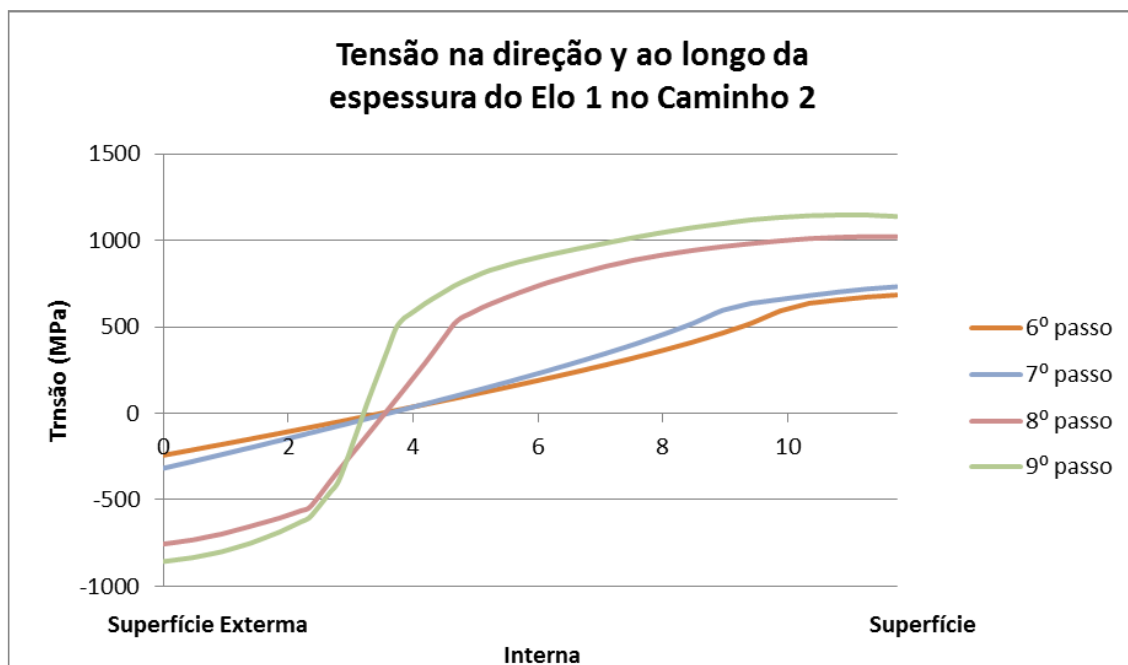


Figura 2.14 - Distribuição de tensões plásticas na direção y [MPa] no Caminho 2 [1].

Foi considerado que a ruptura do Elo 1 ocorrerá quando a maior tensão trativa no elo, localizada em PKt, atingir valor igual ao limite de resistência a tração do material. A ruptura ocorrerá no 9º passo, com uma tensão aplicada em $\frac{1}{8}$ do Elo 2 igual a 565 MPa. Sendo assim a carga de ruptura foi determinada igual a 12,49 toneladas.

Para encontrar o valor analítico, considerando o problema elástico, usou-se o maior Kt para calcular a tensão circunferencial, equação (7). Multiplicando esse valor pela área da secção reta do elo, encontra-se 5,6 toneladas como carga mínima de ruptura [5].

3. Método experimental

3.1. Material e equipamento utilizado

Querosene: foi utilizada uma garrafa de um litro para limpeza da corrente.



Figura 3.1 – Querosene.

Escova de roupa: utilizada na limpeza da corrente.



Figura 3.2 - Escova de roupa.

Estopa: utilizada na limpeza da corrente.



Figura 3.3 – Estopa.

Fita métrica: responsável por medir o comprimento total da corrente.



Figura 3.4 - Fita métrica.

Esmerilhadeira de bancada: para cortar a corrente.



Figura 3.5 - Esmerilhadeira de bancada.

Paquímetro: para calcular as dimensões do elo.

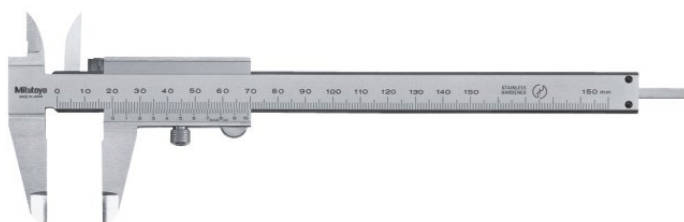


Figura 3.6 - Paquímetro em mm.

Caneta hidrográfica: utilizada para a marcação dos elos.



Figura 3.7 - Caneta hidrográfica.

Máquina de tração Amsler 20kN: para a realização dos testes



Figura 3.8 - Máquina de tração Amsler 20kN.

Vergalhão CA50A Guerdao: utilizado para prender as correntes na máquina.



Figura 3.9 - Vergalhão CA50A Guerdao.

3.2. Experiência

Para iniciar os testes, precisei preparar a corrente.

Primeiramente, ela precisava ser toda limpa para que fosse mais fácil seu manuseio. Era importante retirar toda a graxa do material. Para isso, utilizou-se a escova de roupa e o querosene.

Despejei um litro do querosene numa bacia e coloquei a corrente dentro dela. Peguei a escova e esfreguei os 93 elos com atenção para que não ficasse nada sujo, a parte interna dos elos exigiu que uma estopa fosse utilizado, pois a escova não chegava.

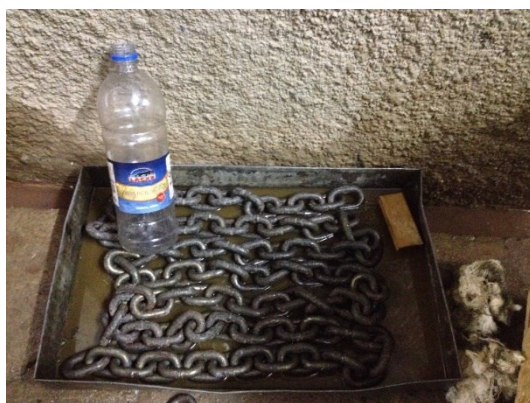


Figura 3.10 - Limpeza da corrente.

Foi um processo lento e cansativo (corrente muito pesada) que durou um dia. Ao fim, retirei a corrente da bacia, deixei num canto e joguei todo o querosene da bacia fora.

No dia seguinte, sequei toda parte ainda úmida da corrente que ficou secando durante a noite. Estiquei-a no chão e, com o uso da fita métrica, medi seu comprimento por inteiro.

Com o auxílio do técnico do laboratório do ITUC, Bira, cortamos a corrente em dez partes, sendo nove com nove elos e uma com três elos, que foi descartada. Foi utilizada a esmerilhadeira de bancada, que pela falta de prática minha, fez-se necessário essa ajuda mencionada.



Figura 3.11 - Corrente sendo cortada.

Em seguida, fiz uma inspeção visual em cada um dos elos para verificar se havia alguma trinca. Não pude observar nenhuma. Também, medi as dimensões do primeiro elo de cada uma das correntes com o uso do paquímetro: espessura, largura interna, largura externa e comprimento externo; e fiz uma marcação com caneta hidrográfica para identificá-los.



Figura 3.12 - Correntes prontas para os testes.

Para a realização dos testes, tive o acompanhamento de Ubiratan Moreira Silva e de meu coordenador, o professor José Luiz de França Freire. Para prender cada corrente na máquina de tração, utilizamos alguns vergalhões que tinham no laboratório. Porém, na realização do terceiro teste, eles começaram a fraturar, fato que interrompeu o andamento dos experimentos, que só pode ter sido terminado no dia seguinte.

A solução foi pegar vergalhões CA50A Guerdau e usiná-los para que ficassem com diâmetro de 15mm e pudessem passar por dentro do elo. Utilizamos uma prensa para dobrá-los. Não tivemos mais problemas depois disso.

Uma precaução que tivemos, foi colocar uma tela em volta da corrente durante os testes, para que os estilhaços não voassem e machucassem alguém. Também, para facilitar a encontrar os pedaços depois. Entretanto, a tela cedeu e tivemos que prender um plástico em volta, resolvendo o problema.



Figura 3.13 - Corrente momentos antes de início do teste.

4. Resultados

4.1. Coleta de dados

A partir das medições feitas no paquímetro, foi possível a coleta dos seguintes dados. Também, considerando a espessura como o diâmetro, foi possível calcular a área da secção transversal de cada elo:

Tabela 5 - Dimensões das correntes.

| Correntes | Espessura (mm) | Largura interna (mm) | Largura externa (mm) | Comprimento externo (mm) | Área secção transversal (mm ²) |
|-----------|----------------|----------------------|----------------------|--------------------------|--|
| 1 | 11,65 | 15,85 | 39,3 | 59,15 | 106,60 |
| 2 | 11,65 | 16,25 | 40,05 | 58,95 | 106,60 |
| 3 | 11,75 | 16,1 | 39,55 | 59,2 | 108,43 |
| 4 | 11,75 | 15,85 | 39,4 | 59,4 | 108,43 |
| 5 | 11,65 | 16,3 | 40,15 | 59,1 | 106,60 |
| 6 | 11,75 | 16,2 | 40,1 | 59,15 | 108,43 |
| 7 | 11,85 | 15,3 | 39,1 | 59,9 | 110,29 |
| 8 | 11,9 | 15,8 | 39,4 | 59,2 | 111,22 |
| 9 | 11,85 | 15,9 | 39,4 | 59,5 | 110,29 |

Incluindo os elos descartados, a corrente tinha 3,35 metros de comprimento.



Figura 4.1 - Medição da corrente inteira.

Após os ensaios de tração para cada corrente, obtive a carga necessária para ruptura, o elo que fraturou e também o gráfico tensão x deformação de cada uma. Utilizei uma balança para calcular a massa:

Tabela 6 - Resultados dos testes

| Correntes | Carga (t) | Massa (g) | Elo fraturado |
|-----------|-----------|-----------|---------------|
| 1 | 9,1 | 970 | 9 |
| 2 | 12,175 | 970 | 9 |
| 3 | 15,75 | 970 | 7 |
| 4 | 8,15 | 970 | 7 |
| 5 | 13,05 | 970 | 7 |
| 6 | 9,1 | 970 | 1 |
| 7 | 10,7 | 970 | 3 |
| 8 | 10,55 | 970 | 1 |

A nona corrente não foi utilizada nos testes. Deixei uma intacta para poder ter uma referência. Numerei os elos das correntes de um a nove, sendo um a de baixo.

Abaixo, as correntes após o teste de tração e suas respectivas curvas tensão-deformação:



Figura 4.2 - Corrente 1



Figura 4.3 - Curva tensão-deformação 1



Figura 4.4 - Corrente 2



Figura 4.5 - Curva tensão-deformação 2

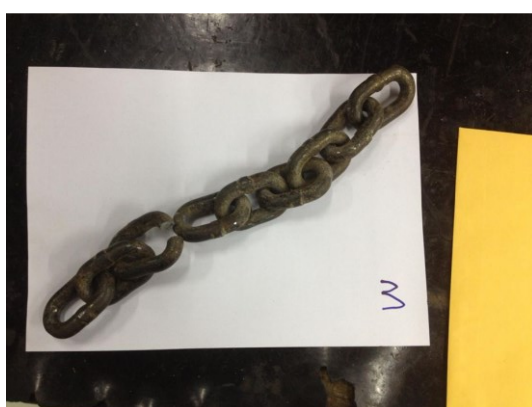


Figura 4.6 - Corrente 3

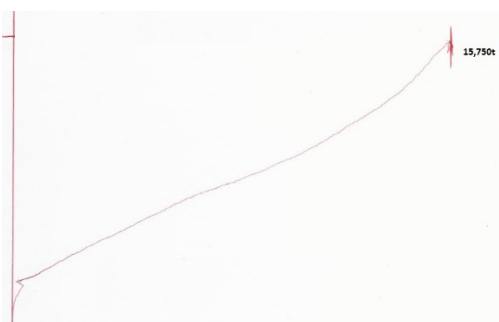


Figura 4.7 - Curva tensão-deformação 3

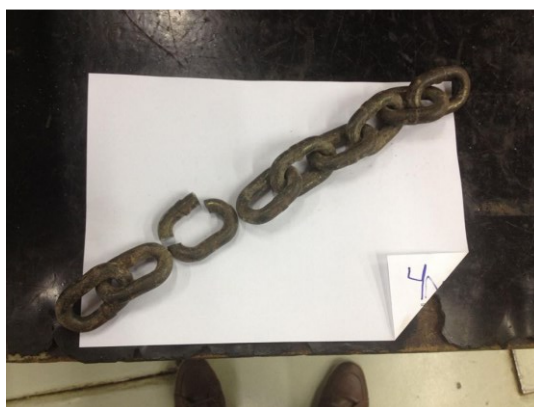


Figura 4.8 - Corrente 4



Figura 4.9 - Curva tensão-deformação 4



Figura 4.10 - Corrente 5



Figura 4.11 - Curva tensão-deformação 5



Figura 4.12 - Corrente 6



Figura 4.13 - Curva tensão-deformação 6



Figura 4.14 - Corrente 7



Figura 4.15 - Curva tensão-deformação 7



Figura 4.16 - Corrente 8



Figura 4.17 - Curva tensão-deformação 8

4.2. Resultados e Discussão

4.2.1. Análise estatística

Foram realizadas duas análises estatísticas das cargas coletadas. Uma pela curva t de Student e outra pela distribuição normal.

A distribuição t é uma distribuição de probabilidade teórica. É simétrica, campaniforme, e semelhante à curva normal padrão, porém com caudas mais largas, ou seja, uma simulação da t de Student pode gerar valores mais extremos que uma simulação da normal. O único parâmetro v que a define e caracteriza a sua forma é o número de graus de liberdade. Quanto maior for esse parâmetro, mais próxima da normal ela será.

Já a distribuição normal é inteiramente descrita por seus parâmetros de média e desvio padrão, ou seja, conhecendo-se estes valores consegue-se determinar qualquer probabilidade nela.

Tabela 7 - Média e desvio padrão.

| | |
|----------------------|---------------|
| Média | 11,07t |
| Desvio padrão | 2,50t |

Para a t de Student, por ter oito dados, seu grau de liberdade será sete. O grau de liberdade é sempre o número de dados menos um. Considerando um intervalo de confiança de 95%, nível de confiança de 5%, temos um limite de 8,982 toneladas até 13,162. Ou seja, 95% dos dados estarão dentro desse intervalo. O desvio calculado é de 2,090 toneladas.

O gráfico gerado abaixo pela distribuição normal é mais preciso por não depender do número de dados, entretanto, é próximo das informações geradas por t de Student. Por esse motivo, é possível relacionar os resultados das duas análises.

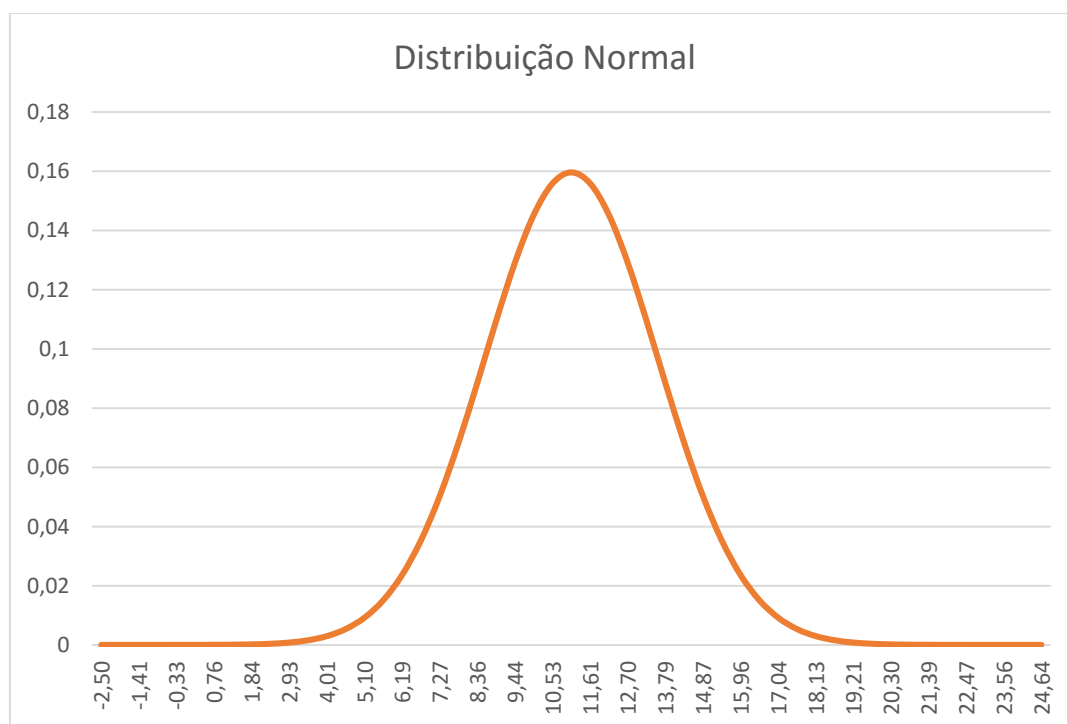


Figura 4.18 - Distribuição Normal.

O eixo y representa a densidade de probabilidade, enquanto x, as cargas.

Comparando a carga de ruptura determinada na simulação (12,490 toneladas) com as duas análises estatísticas feitas, percebe-se que o resultado dos testes foi bem satisfatório. O valor se encontra dentro dos limites probabilísticos e bem próxima do meio do gráfico, a região com maior probabilidade de ocorrência de falha.

Até um nível de confiança de 17%, o valor numérico permanece dentro do intervalo de confiança.

A tabela abaixo mostra os resultados de três testes realizados previamente:

Tabela 8 - Testes realizados previamente

| Cargas de ruptura | | |
|-------------------|-------|-------|
| 8,1t | 10,6t | 11,2t |

Esses valores conferem com os encontrados em meus experimentos. O menor é próximo ao menor que encontrei e o maior é praticamente igual à média de meus resultados.

Em nenhum dos onze testes, a corrente rompeu com carga menor que 5,6 toneladas (o valor mínimo, calculado analiticamente). A probabilidade de isso ocorrer, baseado na distribuição normal, é de 1,39%.

4.2.2. Análise da fratura

Analisando os gráficos coletados no experimento e a fratura, constatei que o material da corrente é extremamente frágil. Durante os testes, não dava pra perceber um regime plástico, pois o elo rompia antes que fosse visível uma queda na tensão. A reta do gráfico crescia linearmente

até a fratura. Observando a foto a baixo, nota-se que a área da secção transversal não variou, explicitando a falta de ductilidade do material.



Figura 4.19 - Fratura de um elo.

4.2.3. Análise dimensional do elo

As dimensões dos nove elos medidos são muito parecidas. O desvio padrão é muito pequeno como pode-se ver na tabela abaixo. E também como já constatado nas cargas de ruptura de cada corrente, percebe-se que as pequenas variações nas dimensões não tiveram influência no resultado dos testes.

Tabela 9 - Média e desvio padrão das dimensões dos elos calculados

| | Espessura (mm) | Largura interna (mm) | Largura externa (mm) | Comprimento externo (mm) | Área secção transversal (mm²) |
|--------------------------|---------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|
| Média | 11,74 | 15,96 | 39,63 | 59,26 | 108,32 |
| Desvio padrão | 0,094 | 0,330 | 0,409 | 0,288 | 1,74 |

5. Conclusão

O valor numérico, calculado por elementos finitos, considera todos as particularidades do elo, fornecendo o valor real para a sua ruptura, enquanto o analítico, por ser só o resultado das equações, despreza diversos fatores, como a plasticidade do material, fornecendo um valor mínimo para o rompimento.

A média dos valores encontrados no experimento ficou bem próxima do ideal, o valor numérico, e todos os resultados foram superiores à carga mínima, valor analítico. Os três testes realizados anteriormente corroboram com o realizados nesse TCC.

Os testes se provaram eficientes e validaram a teoria apresentada no capítulo 2. Apesar disso, nem tudo saiu como esperado.

Em algumas correntes, o elo não fraturou no ponto crítico, mas sim, na posição de 0° , região em que os elos se encostam. Isso pode ocorrer por causa de diversos fatores: trincas passadas despercebidas na inspeção, imperfeições no material, erros na fabricação, desgaste por já terem sido utilizadas anteriormente, falta de alinhamento na máquina de tração gerando tensões indesejadas. Por ser uma região de alto K_t , o elo acabou falhando nesse ponto.

Ocorreu, também, de o primeiro e o último elo falharem algumas vezes. Isso se deve ao fato de ser onde a corrente fica presa ao vergalhão, que por ter um diâmetro diferente, uma curvatura diferente, ser de outro material, acaba podendo gerar maiores tensões no elo, provocando a falha.

Durante o teste da terceira corrente, os vergalhões antigos romperam, fazendo com que tivesse que ser repetido cinco vezes. Porém, não foi o suficiente para comprometer a resistência do material, acabou sendo a corrente que aguentou mais carga.

6. Referências Bibliográficas

- [1] Paiva. Vitor E. L. Análise de tensões de um elo de corrente sujeito a esforços de tração usando o método dos elementos finitos. PUC-Rio. 2015.
- [2] Goodenough. George Alfred. and Lewis Eugene Moore. "The strength of chain links." Bulletin no. 18. University of Illinois. Engineering Experiment Station (1907).
- [3] Boresi. Arthur Peter. Richard Joseph Schmidt. and Omar M. Sidebottom. Advanced mechanics of materials. Vol. 6. New York: Wiley. 1993.
- [4] Seely. Fred B.. and James Ohrea Smith. Advanced mechanics of materials. Vol. 342. New York: Wiley. 1952.
- [5] Informações obtidas no Laboratório de Fotomecânica.