

Área: Sustentabilidade | **Tema:** Produção, Cadeia de Suprimento e Logística Sustentável

ANÁLISE DAS TENSÕES EM CORRENTES DA SÉRIE BL 646 APLICADAS EM EMPILHADEIRAS

STRESS ANALYSIS IN BL 646 SERIES ROLLER CHAINS APPLIED ON FORKLIFTS

Jean Madeira Dos Santos, Fabiano Da Silva Brites e Luis Roberto Centeno Drehmer

RESUMO

O presente trabalho consiste na abordagem dos conceitos teóricos e metodológicos para o desenvolvimento de uma análise das tensões, correlacionadas às falhas em correntes de rolos da série BL aplicadas em empilhadeiras movimentadoras de cargas do setor logístico industrial. Estas correntes, em questão, têm como principal função suspender a carga e elevá-la até a altura do porta-palhete, onde são armazenados os palhetes nos setores de expedição. É indispensável realizar o esclarecimento da importância deste elemento presente nas empilhadeiras para a saúde e segurança das pessoas que estão em contato com este equipamento, uma vez que, ocorrendo uma falha deste item, a segurança de todos próximos estará comprometida, pois, não há elementos de segurança que possam evitar uma queda do carro de elevação, caso a corrente rompa de forma súbita, motivo de estudo para este trabalho. Para a análise, foram mensuradas as acelerações geradas pela operação do equipamento em deslocamento numa pista irregular, sendo a coleta destes dados realizada com acelerômetro posicionado em 4 pontos no mastro do equipamento, coletados de forma sequencial. Também foi realizada a identificação do material utilizado na fabricação destes elementos de máquina, por meio de metalografia e espectrometria. Ao final do estudo foram demonstrados a partir de gráficos e tabelas, os valores de tensão máxima que estas correntes estão expostas. Como resultado deste trabalho foi observado que a tensão de cisalhamento corresponde à 30 % da tensão normal, e que os picos da tensão normal provavelmente são os principais causadores das falhas.

Palavras-Chave: Empilhadeira. Projeto. Tensões. Segurança.

ABSTRACT

The present paper consists of the approach of the theoretical and methodological concepts to develop a stress and failure analysis of the BL series roller chains applied to the industrial logistic load handling forklifts. These chains have the main function of lifting the load and raising it to the height of the pallet holder, where the pallets are stored in the shipping sectors. It is essential to clarify the importance of the roller chains in forklifts for the health and safety of people who are in contact with this equipment, since, if the failure of this item occurs, the safety of everyone nearby will be compromised, because there are no safety elements that can prevent a fall of the forklift car if the chain suddenly breaks, a reason for this study. For the analysis, the accelerations were measured from the forklift in real operation, submitted to a random road profile, with four points of measurement, acquired sequentially. The material used in the fabrication of the roller chain was also identified by metallography and spectrometry. At the end of this study, the maximum stress values in the roller chains were shown in figures, graphs, and tables. As a result of this work, it was observed that the shear stress corresponds to 30% of the normal stress and that the normal stress peaks are probably the main causes of the failures.

Keywords: Forklift. Project. Stress. Safety.

ANÁLISE DAS TENSÕES EM CORRENTES DA SÉRIE BL 646 APLICADAS EM EMPILHADEIRAS

1 INTRODUÇÃO

Um dos desafios da logística industrial é o de aumentar a capacidade dos porta-paletes com uma área de armazenagem constante. Dentre as soluções empregadas pela indústria para este conflito é o aumento da altura dos porta-paletes (estante ou prateleira de armazenamento) que, por vezes, ultrapassa os 10 metros. A partir desta demanda, os fabricantes de empilhadeiras projetam máquinas para atender esta exigência fabril, com torres que possuem a capacidade de elevar uma carga a alturas de até 12 m, permitindo assim acompanhar a evolução logística. Essa elevação de carga aumenta o potencial de acidentes e queda dos carros de elevação suspensos pelas correntes da série BL.

Sendo assim, este trabalho remete a um estudo de caso na empresa Carmak, que está situada na cidade de São Leopoldo/RS, segundo os dados coletados pelos históricos de manutenções, em uma população de aproximadamente 400 equipamentos, e em uma cada trimestre apresenta falha com este tipo de corrente. Em termos de abrangência, a Carmak é uma empresa nacional de locação e venda de empilhadeiras que está presente em diversos estados brasileiros em constante expansão, atendendo diversos armazéns logísticos e grandes empresas de diversos ramos de atuação, contextualizando esse tipo de estudo de caso e ocorrência de falhas. As correntes avaliadas são fabricadas segundo a norma ASME B29.8 (2002) na qual sugere o dimensional e a capacidade de carga para casos comuns de utilização. Em aplicações reais, essas correntes sofrem variações de temperaturas e de carga, além de estar em contato com agentes químicos, encontrados nas olarias, curtumes e frigoríficos.

A abordagem de um estudo metodológico e prático de análise das tensões em correntes da série BL, aplicadas à suspensão de cargas em empilhadeiras de movimentação logística industrial se faz necessário no meio industrial. Um dos riscos que há grande potencial de acidente é a falha súbita das correntes que elevam a carga suspensa pelas lanças do equipamento e, ao quebrar uma corrente de suspensão destas cargas, o carro de elevação entra em queda-livre, e só irá parar ao atingir o solo.

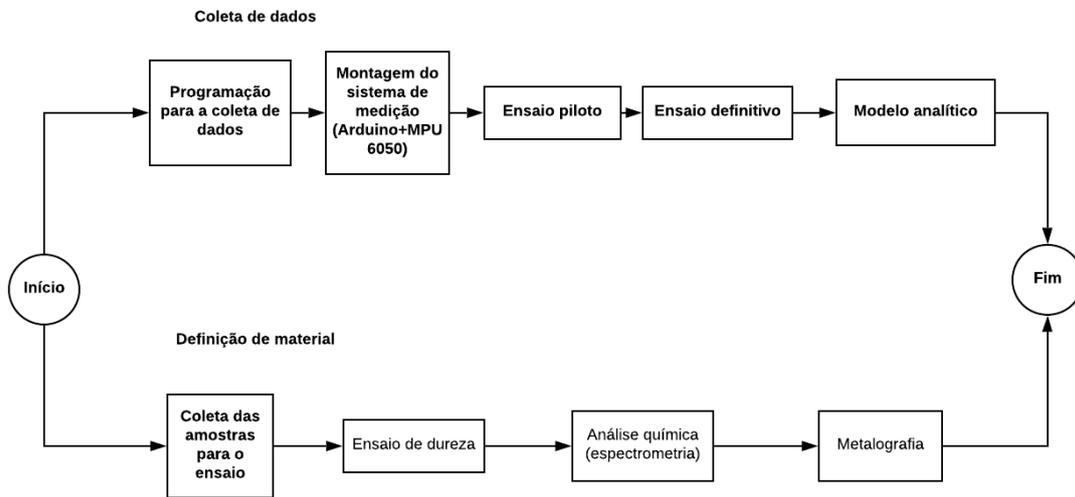
Para a execução do presente estudo, faz-se necessário o uso de um instrumento de medição para que sejam mensuradas as acelerações geradas pela operação do equipamento em deslocamento numa pista irregular, sendo a coleta destes dados realizada com acelerômetro MPU6050 em comunicação de uma plataforma Arduino UNO. Para Souza *et al.* (2011), a plataforma de prototipagem Arduino é uma alternativa funcional e de fácil programação, se tornando uma ferramenta ideal para estudantes, projetistas e engenheiros.

Frente ao contexto, este trabalho propõe analisar as tensões conforme os níveis de carregamentos das correntes da série BL 646, aplicadas em uma empilhadeira retrátil com propulsão elétrica da marca BT Toyota modelo RRE160, com uma altura de elevação máxima de 9,5 m e uma capacidade de carga de 1,6 ton, e assim mensurar suas forças e tensões para diferentes níveis de cargas aplicadas. Esse objetivo geral desdobra-se nos seguintes objetivos específicos: (a) modelar analiticamente a corrente sob tração; (b) identificar, por meio de metalografia e espectrometria de amostras coletadas, o tipo de material das correntes da série BL, a sua microestrutura e dureza; (c) realizar ensaios experimentais para a coleta das acelerações em quatro pontos do sistema; (d) comparar as tensões que a corrente está submetida por meio de gráficos a partir das acelerações e compará-los com a norma ASME B29.8 (2002).

2 METODOLOGIA

A metodologia apresentada neste artigo orienta os procedimentos necessários para a obtenção dos resultados para a análise das tensões envolvidas no tensionamento da corrente avaliada. A Figura 1, a seguir, ilustra o fluxograma da metodologia adotada, indicando as etapas dos procedimentos:

Figura 1 – Fluxograma da metodologia.



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

2.1 DEFINIÇÃO DO MATERIAL

A corrente estudada trata-se da série BL 646 que, conforme a norma ASME B29.8 (2002), é indicada para aplicações que envolvam elevação de cargas. O estudo se concentra na aplicação deste elemento de máquina em uma empilhadeira do modelo RRE160, com altura de elevação máxima de 9500 mm. Na Figura 2, a seguir, o modelo do equipamento utilizado para os testes e a corrente estudada (indicada por uma seta) podem ser observados:

Figura 2 – Equipamento utilizado para testes.



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

A corrente foi removida de um equipamento seminovo, com 2550 h de uso, pela equipe técnica local. Após a remoção da corrente, foi realizada a desmontagem de um conjunto de seus elos, desta forma obtendo uma amostra de um elo e um pino visando o teste de dureza, a análise química e a metalografia. Então, foi realizado o ensaio de dureza do material no Laboratório de Metalurgia e Metalografia da Universidade do Vale dos Sinos (UNISINOS). O ensaio foi realizado com a escala de dureza Rockwell C (HRC), utilizando equipamento Mitutoyo HR-400, três vezes com cada amostra por meio de um penetrador com ponta de diamante. Foi aplicado uma pré-carga de 150 kgf por 15 segundos, e o resultado apresentado no *display* do durômetro. A análise química (espectrometria) e a metalografia das amostras obtidas foram realizadas no Laboratório de Ensaio e Calibração CQS (reconhecido pela norma NBR ISO/IEC 17025), localizado na cidade de São Leopoldo/RS. A espectrometria foi realizada em condições ambientais controladas com um Espectrômetro de Emissão Óptica Oxford, e a metalografia das amostras foi realizada em condições controladas por um Microscópio Metalográfico Olympus.

2.2 AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição dos dados referentes às acelerações da corrente foi realizada pelo conjunto de um Arduino UNO e um acelerômetro MPU6050. O método utilizado para a coleta dos dados procurou realizar a comunicação entre um Arduino UNO e um sistema de acelerômetro e giroscópio 3 Eixos 6 DOF MPU-6050 GY-521, com as seguintes especificações: acelerômetro e giroscópio MPU-6050; tensão de operação de 3 a 5 V; conversor A/D de 16 bits, comunicação protocolo padrão I²C; faixa de giroscópio: ± 250 , 500 , 1000 , 2000 °/s; faixa de acelerômetro: ± 2 , ± 4 , ± 8 , ± 16 g; dimensões: $2 \times 1,6 \times 0,1$ mm; tolerância: ± 3 % ; e resolução: 1 mg. O Arduino é uma plataforma que pode ser programada para processar entradas e saídas entre periféricos conectados externamente a ele, como utiliza código aberto, seu desenvolvedor disponibiliza o software Arduino, para a sua programação. A programação é realizada por meio de uma IDE, no qual, o usuário deve colocar o código na linguagem Arduino baseada em C/C++. A IDE (Acelerômetro, 2015).

A programação foi extraída na plataforma GitHub, já pronta para a utilização no Arduino UNO, sendo necessárias algumas alterações e inclusão do *offset* referente à calibração do acelerômetro MPU6050. A Figura 3 exibe a configuração para o *offset* do sistema:

Figura 3 – Posicionamento MPU6050 para *offset*



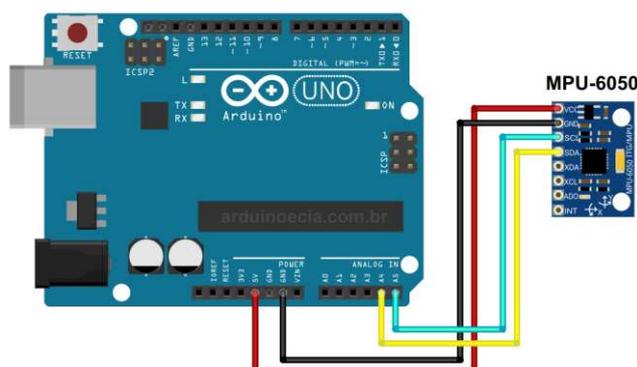
Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Para realizar a validação da coleta de dados, foi novamente obtida da plataforma GitHub uma biblioteca de programações para o Arduino UNO, extraindo o *offset* para a

inclusão no programa. Estes valores de *offset* são parâmetros de correção que foram usados para a medição com o MPU6050, considerando que cada acelerômetro possui estes valores específicos para os eixos x, y e z. Para a obtenção dos valores de *offset* foi necessário posicionar o MPU 6050 em uma mesa de superfície plana, e paralela ao solo, sendo fixado através de fita isolante para que não houvesse movimentação durante a coleta de dados referentes ao *offset*. Após está fixação, foi executado o programa na plataforma Arduino, devidamente conectado ao acelerômetro. A partir da coleta destes *offsets* gerados, foi possível incluir estes valores no código de programação do Arduino para que os dados obtidos estejam condizentes ao real mensurado. Para o processo de montagem do sistema no equipamento em questão, foi confeccionado um chicote de quatro vias com 3 m de comprimento para alcance dos quatro pontos de medição no equipamento.

Na Figura 4 é apresentada a ligação realizada entre a plataforma Arduino e o instrumento MPU 6050, sabendo que a interface de comunicação do MPU 6050 trata-se da I²C (*Inter Integrate Circuit*), a ligação se torna simples, envolvendo apenas as conexões da entrada analógica, A4 (SDL – *Serial Data Line*) e A5 (*Serial Clock Line*) do Arduino UNO e também as entradas VCC (Alimentação 5 V) e GND (Aterramento). A comunicação com o computador foi realizada por meio de cabo USB, e que cujos dados coletados foram armazenados em blocos de notas para a compilação em Excel.

Figura 4 – Acelerômetro e giroscópio 3 eixos 6 DOF MPU-6050 GY-521



Fonte: ACELERÔMETRO (2015, p. 1)

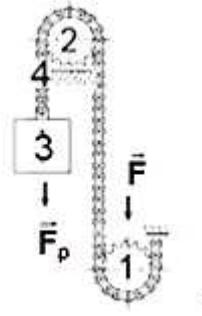
O posicionamento do MPU 6050 se deu em quatro pontos distintos conforme o Quadro 1. O sistema de elevação pode ser observado esquematicamente na Figura 5 e é possível verificar como o acelerômetro foi posicionado no mastro da empilhadeira, ilustrando assim os respectivos pontos de coleta para os testes.

Quadro 1 – Posição dos pontos de coleta.

Ponto	Localização
1	Polia inferior da corrente
2	Polia superior da corrente
3	Carro de elevação da carga
4	Aproximadamente no centro de gravidade da corrente em relação à polia superior e ao carro de elevação

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Figura 5 – Esquema de fixação do sensor



Fonte: Adaptado de Tsubaki (2011, p.7).

3 ENSAIOS

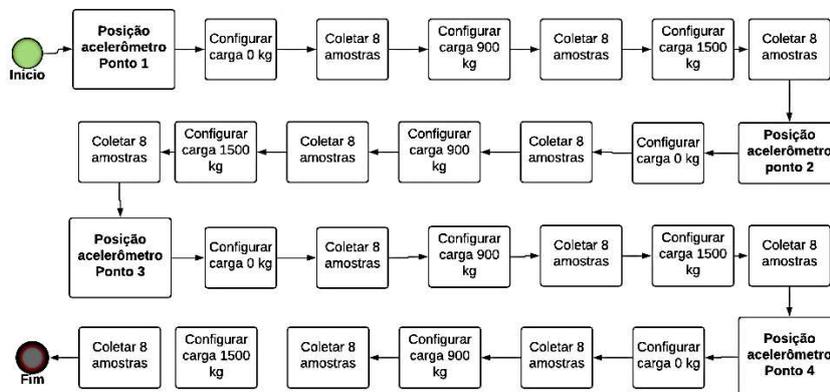
Os ensaios realizados para as coletas de dados das acelerações envolvidas na operação do equipamento foram dadas em ensaio piloto preliminar e ensaio definitivo, de forma que fosse possível identificar as possíveis melhorias nas coletas de dados.

3.1 ENSAIO PILOTO PRELIMINAR

Para ensaio piloto preliminar, definiu-se que o acelerômetro trabalharia na faixa de ± 2 g. Logo, este parâmetro foi alterado junto à programação do Arduino UNO. Para a conversão dos dados obtidos na medição, foi utilizado um fator de sensibilidade de 16384 LSB/G (bit por g) de acordo com a faixa de trabalho pré-selecionada e determinada no *datasheet* do MPU 6050. A partir disso, foi possível converter os valores coletados pelo acelerômetro em LSB para uma aceleração conhecida em unidade de medida g. Os valores são obtidos em LSB, sendo necessário realizar a conversão desta medida para valores de g. Nesta conversão, dividiu-se o valor obtido no teste pelo fator de sensibilidade de acordo com a escala configurada no Arduino. Os dados obtidos a partir das coletas foram então compilados numa planilha de Excel.

Na Figura 6, a seguir, é ilustrado o fluxograma das etapas do ensaio piloto:

Figura 6 – Fluxograma do ensaio piloto



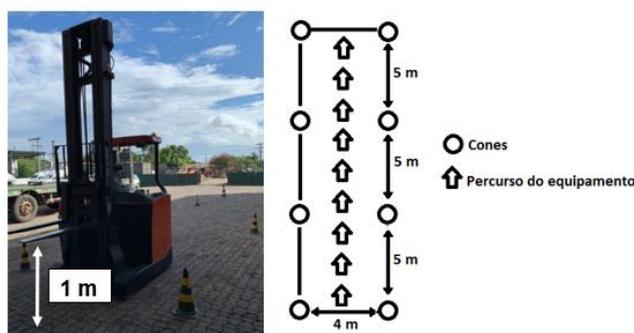
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Devido ao limite máximo de carregamento suportado pela empilhadeira ser de 1600 kg, a carga sobre os garfos foi composta de duas baterias tracionárias: uma com massa de aproximadamente 900 kg, e outra com aproximadamente 600 kg. A partir disto foram definidas três cargas de ensaio com valores de 0 kg, 900 kg e 1500 kg, para aplicação durante os testes. Estas cargas foram escolhidas de forma a simular um caso sem carga (0 kg), outro caso próximo à metade do carregamento máximo (900 kg), e por fim, a carga perto do carregamento máximo (1500 kg). Padrões similares aos que são adotados pela indústria que utiliza esta empilhadeira.

A empilhadeira se movimentou por uma trajetória retilínea por 15 m com suas lanças elevadas a uma altura de 1 m em relação ao solo, simulando assim uma condição próxima a de operação. Foi definido que o equipamento realizasse 8 vezes o trajeto de 15 m para cada carga em cada ponto de coleta. Logo, sabendo que são 4 pontos de coleta e 3 cargas diferentes, foram realizados 96 vezes o percurso para coleta de dados. O operador do equipamento não foi substituído durante os testes, para que não ocorressem variações nos resultados devido ao modo de operação de cada operador.

Na Figura 7, é possível observar a pista de testes e as configurações iniciais do equipamento para o ensaio piloto. Os cones estão afastados com 5 m de distância entre eles longitudinalmente e uma abertura de 4 m na transversal. A coleta de dados, se deu apenas no sentido do percurso do equipamento

Figura 7 – Pista do ensaio piloto



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

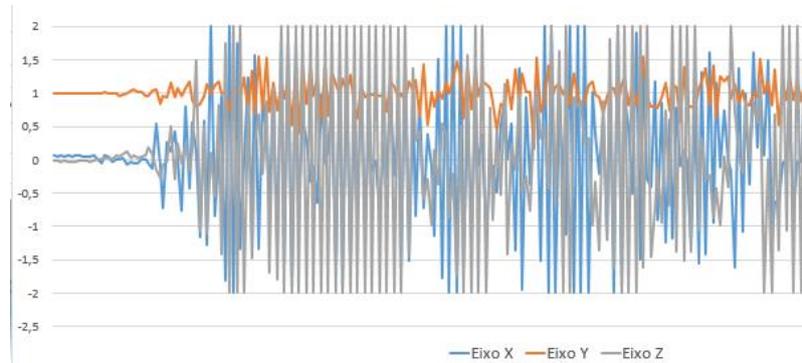
Para a mensuração de elevação da carga, o equipamento possui um sistema de medição de altura dos garfos, cuja resolução é de 0,01 m, e seu sistema de medição de carga possui como resolução 5 kg. Todos estes indicados para o operador através de um *display*. O sistema de medição de altura é realizado a partir de um *encoder* fixo na torre do equipamento. Quando o carro de elevação se movimenta, este sensor rotaciona emitindo pulsos elétricos para o sistema de controle que, por sua vez, realiza a leitura da altura do equipamento. Além disso, do ponto 0 m até 0,7 m de altura há uma régua metálica imóvel, fixa na base da torre, e o carro deslocador possui um sensor indutivo que acompanha o seu movimento próximo a essa régua. Quando o sensor ultrapassa a altura da régua (0,7 m) interrompendo assim a emissão do sinal elétrico, o sistema de controle realiza a leitura que a elevação está a 0,7 m. Desta forma o equipamento está realizando seu auto ajuste sempre que ultrapassa a altura máxima da régua.

3.2 ENSAIO DEFINITIVO

No ensaio piloto foi definido um fundo de escala para o MPU 6050 de ± 2 g, porém foi verificado que possivelmente a aceleração do sistema atingiria amplitudes

maiores que o valor de fundo de escala configurado, conforme explicitado no gráfico da Figura 8.

Figura 8 – Exemplo da coleta de dados no ensaio piloto

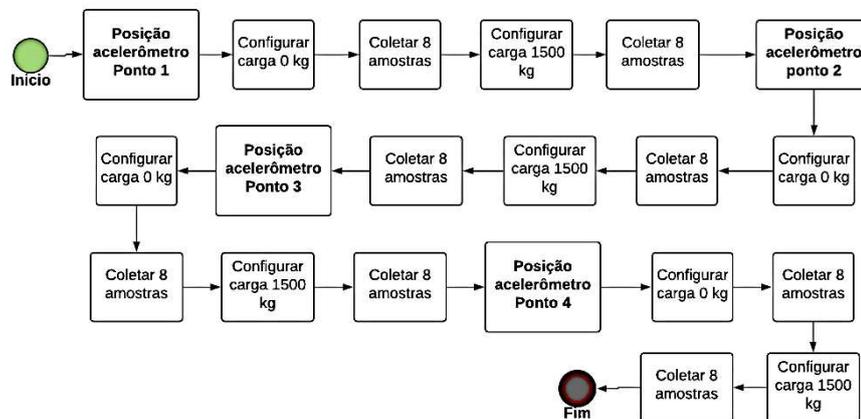


Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Baseado no gráfico da Figura 8 constata-se que as acelerações provavelmente ultrapassariam o valor de 2 g, devido a isto, para a coleta de ensaio definitivo, foi utilizado um fundo de escala para o MPU 6050 de ± 16 g. Desta forma alterou-se o valor de fator de sensibilidade para 2048 LSB/g, bem como, a biblioteca do MPU6050 modificando o fundo de escala para a configuração desejada. Os demais parâmetros e *layout* da planilha para a coleta de dados não foram alterados, mantendo o padrão de coleta do ensaio piloto.

Após uma prévia análise dos dados coletados no ensaio piloto, foram verificados que os valores obtidos com a carga intermediária (900 kg) se aproximavam dos valores obtidos pelos testes com a carga maior (1500 kg). Devido a isto, para o ensaio definitivo foi retirado a carga intermediária, por considerar que um resultado similar será obtido com a carga de maior massa. Logo, e embora tenha sido mantido o número de amostras por configuração, houve uma redução no número de testes, pois a carga de 900 kg não foi mais utilizada, reduzindo o número de ciclos de coleta de dados de 96 para 64 repetições. Na Figura 9 está representado o fluxograma do teste definitivo, facilitando assim sua compreensão.

Figura 9 – Fluxograma ensaio definitivo



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

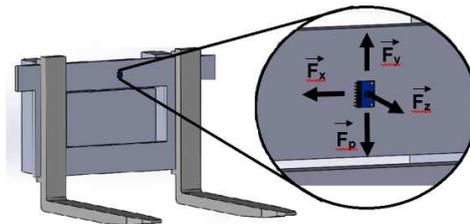
O equipamento realizou o mesmo trajeto definido no ensaio piloto, com mesma altura dos garfos e dimensões da pista; porém, diferentes configurações de carga (0 kg e 1500 kg). Para o ensaio definitivo, foram realizadas as calibrações de carga e velocidade conforme se procedeu no ensaio piloto.

3.3 MODELO ANALÍTICO

Neste tópico, será descrito as considerações efetuadas para se obter o diagrama de corpo livre do sistema, bem como, suas respectivas reações, e o equacionamento das tensões atuantes na corrente. Como estas tensões são provenientes da carga que está suspensa pela corrente, logo esta análise utilizou, prioritariamente, os valores coletados no ponto 3.

O diagrama de corpo livre, da carga que está suspensa pela corrente, foi estipulado conforme apresentado na Figura 10, onde é possível identificar a direção e o sentido das forças atuantes (F_x , F_y e F_z) e resultantes da vibração gerada pelo trajeto da empilhadeira durante os testes, e da força peso (F_p) gerada pela massa suspensa na corrente (carro de elevação + carga sobre os garfos).

Figura 10 – Diagrama de corpo livre para o carro de elevação



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

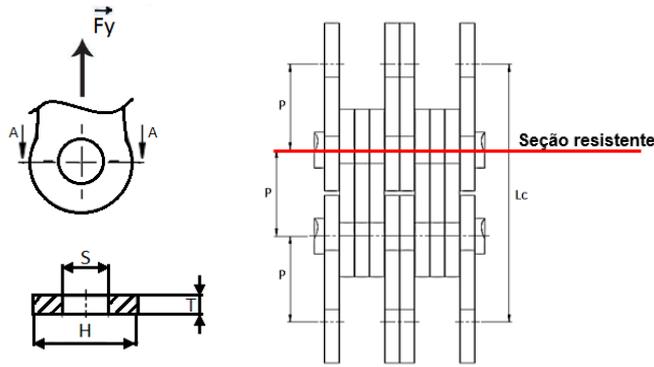
Para definição da massa do conjunto que está suspenso pela corrente (um carro de elevação + duas lanças) foi preciso identificar estes valores em catálogo do fabricante. A massa do carro de elevação foi obtida a partir do catálogo do equipamento com o valor de 122 kg, conforme a sua respectiva capacidade (1,6 ton) e altura de elevação (9500 mm). Sabendo que as lanças utilizadas neste equipamento são do padrão ISO 2A e seu comprimento é de 1200 mm, foi verificado o catálogo de lanças da SAUR (2015) definindo assim a massa que o par de lanças possui 104 kg. A Equação 1 define o valor da massa suspensa pela corrente (m_c).

$$m_c = (122 + 104) + m_t \quad (1)$$

onde m_t é a massa da carga teste e m_c é o valor da massa suspensa pela corrente.

Para o cálculo da tensão normal sobre a corrente, tem-se aqui representado na Figura 11 a menor área de seção transversal do elo, logo os maiores valores de tensão. Desta forma, simplificando o conjunto e como consequência os cálculos envolvidos.

Figura 11 – Representação da corrente BL646 submetido a tração



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

O cálculo da tensão normal em relação ao eixo y , conforme Figura 11, para o modelo analítico é demonstrado nas equações 2 a 4.

$$\sigma_y = k_f \frac{\sum F}{A_T} \quad (2)$$

$$\sigma_y = k_f \frac{F_y}{N_e (H - S) \cdot T} \quad (3)$$

$$\sigma_y = k_f \left(\frac{m_c \cdot (a_y \cdot g)}{N_e (H - S) \cdot T} \right) \quad (4)$$

onde: H é a largura do elo; S é o diâmetro do furo do elo; T é a espessura do elo; A_T é a área da seção de resistência a tração do elo; m_c massa da carga suspensa; N_e é o número de elos na seção de menor resistência; a_y é a aceleração do eixo y coletada pelo acelerômetro, g é a aceleração da gravidade e k_f é o concentrador de tensão.

O equacionamento da aplicação da tensão de cisalhamento, para o caso da corrente, se deu nas superfícies destacadas. Para que desta forma fosse possível determinar sua equação.

O equacionamento da tensão cisalhante aplicado ao caso estudado é demonstrado nas equações 5 a 7.

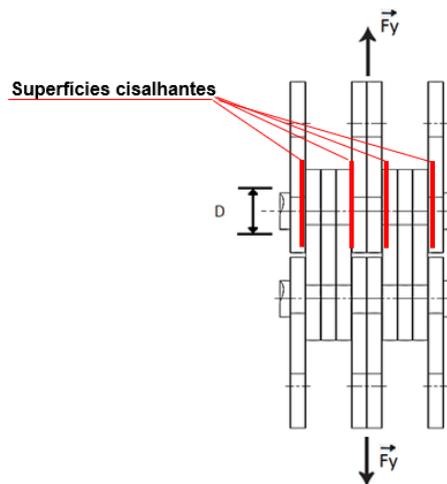
$$\tau_p = F / A_{cis} \quad (5)$$

$$\tau_p = F_y / \left(N_{cis} \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \right) \quad (6)$$

$$\tau_p = (m_c \cdot (a_y \cdot g)) / \left(N_{cis} \left(\pi \cdot \frac{D^2}{4} \right) \right) \quad (7)$$

onde N_{cis} é o número de superfícies cisalhantes na seção resistente; A_{cis} é a área da seção resistente ao cisalhamento; m_c é a massa da carga suspensa; a_y aceleração coletada resultante do eixo y ; D diâmetro do pino e g é a aceleração da gravidade.

Figura 12 – Representação da corrente BL646 submetido a cisalhamento

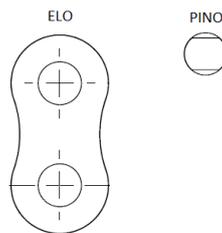


Fonte: elaborado pelo autor (2019)

4 RESULTADOS

Os resultados obtidos pela análise química definem o material como sendo um aço SAE 1045. Já nos resultados das metalografias, foram selecionadas as seções para análise de cada amostra, conforme a característica de seus possíveis processos de fabricação. Segundo o Laboratório CQS, onde foram realizados os ensaios, as seções que apresentam melhores resultados para a análise da microestrutura estão apresentadas na Figura 13.

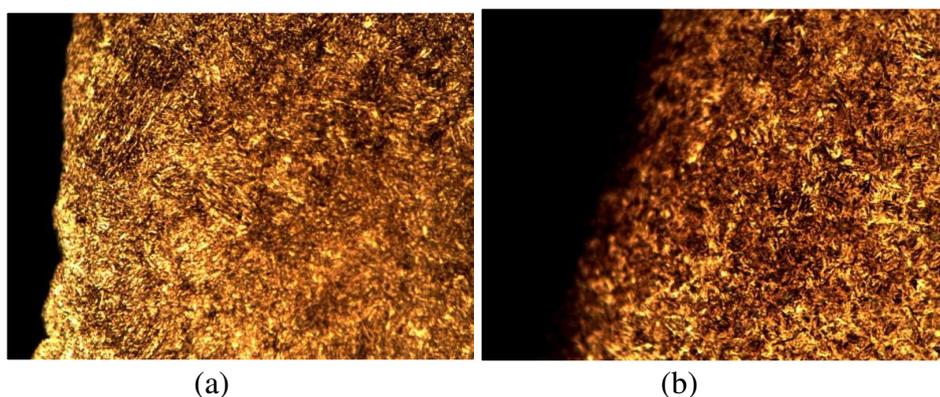
Figura 13 – Superfície metalográfica



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Nas imagens fornecidas pelo laboratório não foram incluídas as escalas nas fotografias, portanto, é possível que haja distorções nos tamanhos de grão decorrentes, possivelmente, de ajustes no tamanho das figuras. Como resultado da análise do elo, é possível observar na Figura 14 que sua microestrutura é formada predominantemente por martensita revenida. A análise microestrutural no pino possui um resultado similar ao do elo, corroborando a sugestão de que possuem um mesmo tratamento térmico.

Figura 14 – Microestrutura do Elo (a) e Pino (b)



Fonte: CQS (2019, p. 2)

Referente ao teste de dureza o elo apresentou um valor médio de 43,7 HRc, e o pino 45,4 HRc. Um dos motivos que podem resultar nessa diferença, possivelmente, é à influência da geometria na velocidade do resfriamento do material no processo de têmpera, já que suas composições químicas e suas microestruturas são similares.

Com os resultados do ensaio de dureza foi possível estimar os valores de limite de resistência à tração do material. A Tabela 2 apresenta uma relação entre a dureza e a sua estimativa do limite de resistência em Mpa

Tabela 2 – Relação entre dureza e resistência à tração

Dureza Rockwell C 150kg cone diamante (HRc)	Resistência à tração aproximada σ_{ut} (MPa)
43,1	1416
44,5	1465
45,7	1514

Fonte: Adaptado de SENAI (2005, p. 103)

A partir dos resultados obtidos com os ensaios de dureza, torna-se possível ainda estabelecer os limites de resistência à tração para os dois materiais ensaiados. Para a obtenção destes valores, foi realizado uma interpolação linear com os dados apresentados na Tabelas 2. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Estimativa de resistência à tração

	Elo	Pino
Dureza média (HRc)	43,7	45,4
Estimativa do limite de resistência à tração σ_{ut} (MPa)	1437	1502

Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Conforme metodologia do presente trabalho, na Tabela 4 são apresentados os dados de entrada para a análise das tensões na corrente.

Tabela 4 – Dados de entrada

Nome	símbolo	Unidade de medida	Valor		Descrição
			Sem carga	Com carga	
Massa do teste	m_t	kg	0 kg	1500 kg	Carga sobre os garfos da empilhadeira
Massa suspensa	m_c	kg	226 kg	1726 kg	Definido pela Equação 1
Sensibilidade ao entalhe	q	Adimensional	0,96	0,96	Norton (2013)
Concentrador de tensão teórico	k_t	Adimensional	2,225	2,225	Norton (2013)
Concentrador de tensão dinâmico	k_f	Adimensional	2,176	2,176	Norton (2013)
Altura do elo	H	mm	18,11	18,11	Definido pela ASME B29.8 (2002)
Diâmetro do furo do elo	S	mm	7,96	7,96	Definido pela ASME B29.8 (2002)
Diâmetro do pino	D	mm	7,94	7,94	Definido pela ASME B29.8 (2002)
Espessura do elo	T	mm	3,3	3,3	Definido pela ASME B29.8 (2002)
Número de elos na seção resistente	N_e	Adimensional	4	4	-
Número de seções cisalhantes	N_{cis}	Adimensional	4	4	-
Área da seção resistente à tração	A_t	mm ²	133,98	133,98	-
Área da seção resistente ao cisalhamento	A_{cis}	mm ²	198,05	198,05	-
Aceleração da gravidade	g	m/s ²	9,81	9,81	-

Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Para fins de complementação e comparação, o limite de fadiga sob flexão rotativa para os aços é definido conforme Equações 7 e 8 (NORTON, 2013).

$$\sigma_{e,r} \cong 0,5\sigma_{ut} \quad \sigma_{ut} < 1379 \text{ MPa} \quad (7)$$

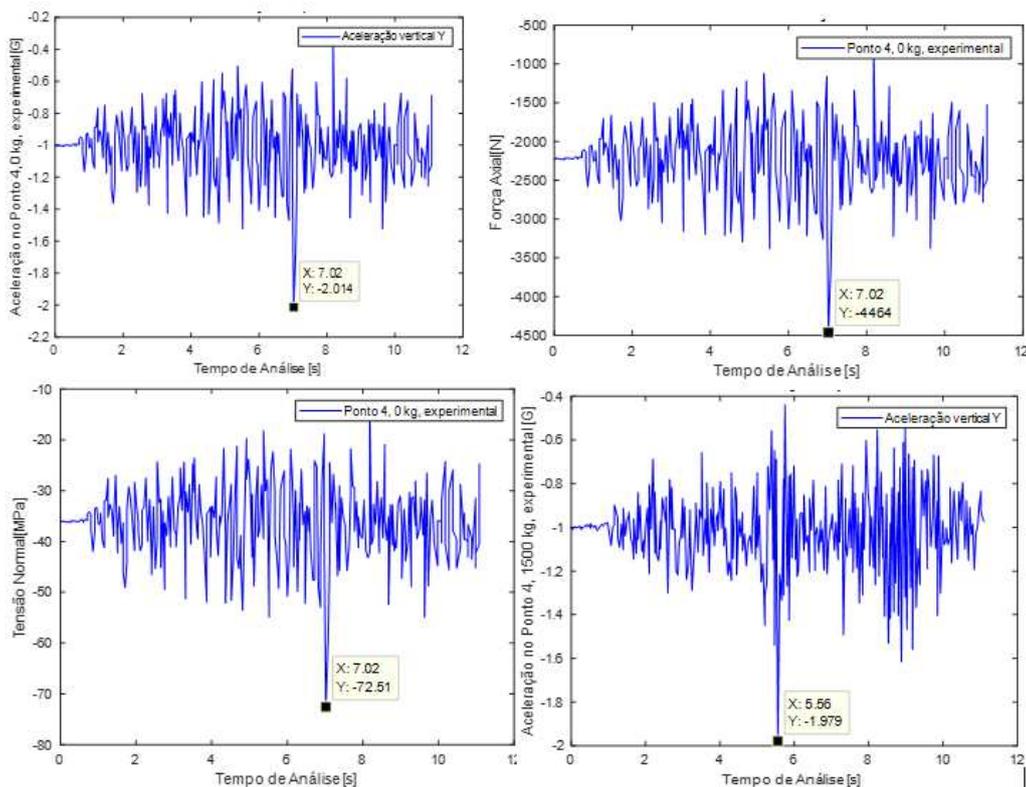
$$\sigma_{e,r} \cong 689,5 \text{ MPa} \quad \sigma_{ut} \geq 1379 \text{ MPa} \quad (8)$$

onde σ_e é a tensão limite de fadiga sob flexão rotativa; σ_{ut} é a tensão limite de resistência à tração do material. Sabendo que o limite de resistência estimado para os materiais estudados neste capítulo ultrapassa o valor de 1379 MPa. Então, o valor do limite de resistência a fadiga pode ser aproximado por 689,5 MPa tanto para o elo, quanto para o pino. Estes valores são aplicados para casos de flexão rotativa, de forma que, para obter os valores do limite de fadiga sob força normal é necessário reduzir de 10% a 30% o valor do limite de fadiga sob flexão rotativa (NORTON, 2013). Para o caso estudado será considerado a média entre os valores, ou seja, 20% inferior ao limite de fadiga à flexão rotativa. Este valor é explicitado na Equação 9.

$$\sigma_{et} \cong 551,6 \text{ MPa} \quad (9)$$

A Figura 15 apresenta o gráfico do histórico das acelerações, forças e tensões no ensaio sem carga sobre os garfos. É possível observar que o pico de aceleração ocorreu aproximadamente aos 7 s de teste, apresentando um valor absoluto aproximado de 2 g e estes dados apresentam um valor absoluto efetivo (RMS) de 1,03 g. O pico absoluto máximo da força axial coletado no ensaio em questão foi de aproximadamente 4464 N após 7 s de testes, e o valor efetivo (RMS) para esta coleta de dados foi de 2290,3 N. Os valores apresentados no gráfico com sinal negativo referem-se às forças trativas na corrente. No início do teste o valor de tensão axial é aproximadamente 36 MPa, este valor refere-se à tensão que a corrente está submetida quando o equipamento está parado, porém, quando a empilhadeira inicia o movimento é observada variações desta tensão onde é possível obter um valor efetivo absoluto (RMS) de 37,2 MPa, e também, um valor máximo de 72,51 MPa no ponto de aproximadamente 7 s, este valor de pico encontrado atinge aproximadamente 13 % do valor estimado para o limite de fadiga. o histórico de tensões cisalhantes na corrente ao longo do tempo a corrente estava submetida a uma tensão de cisalhamento aproximada de 11,2 MPa, após o sistema entrar em movimento cuja velocidade foi assumida constante, o valor efetivo (RMS) foi de aproximadamente 11,5 MPa, com um pico máximo de tensão aos 7 s no valor aproximado de 22,5 MPa. Estes valores apresentados são de baixa magnitude, quando relacionados à tensão normal, atingindo cerca de 30 % da tensão normal.

Figura 15 – Resultados sem carga

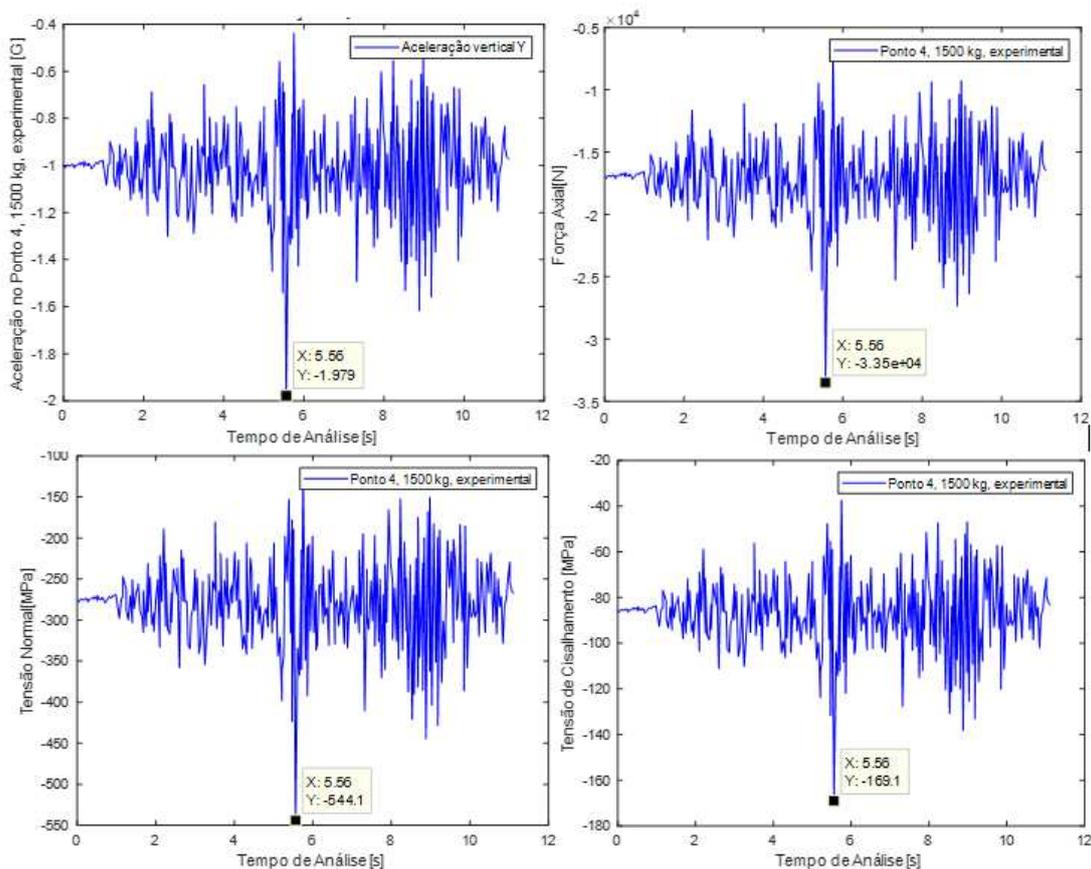


Fonte: elaborado pelo autor (2019)

A Figura 16 mostra o gráfico do histórico das acelerações, forças e tensões para o ensaio com carga de 1500 kg. É observado que a tempo de aceleração é aproximadamente 40 % maior que para o caso sem carga. É possível identificar que o pico de aceleração ocorreu a aproximadamente 5,5 s de teste apresentando um valor

próximo a 1,9 g, ou seja, 5 % menor que o pico para o caso anterior (sem carga). O valor médio efetivo para estes dados é de aproximadamente 1,03 g. O histórico de forças axiais. No início do teste o valor absoluto da força axial está próximo a 16900 N devido à massa suspensa pela corrente. Após aproximadamente 5,5 s de teste, foi atingido um pico em torno de 33500 N. Este valor é cerca de 7,5 vezes maior que o valor obtido no caso sem carga. No início do teste o valor da tensão normal é aproximadamente de 275 MPa, valor equivalente a 50% do valor limite de fadiga estimado para este material. O valor efetivo (RMS) é por volta de 284 MPa e o valor máximo observado é de 544,1 MPa aos 5,5 s. Este valor de pico obtido é o que mais se aproxima do limite à fadiga estimado para este material, representando cerca de 98% em relação a estimativa. No início dos testes da tensão de cisalhamento a corrente esta submetida a aproximadamente 86 MPa e após o sistema entrar em movimento o valor efetivo (RMS) se aproxima de 88,5 MPa. O valor máximo obtido pelo histórico de tensões cisalhantes foi de 169,1 MPa. Estes valores são relativamente baixos pois representam aproximadamente 30 % da tensão normal.

Figura 16 – Resultados com carga 1500 kg



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos e analisados neste capítulo, sugere-se que as correntes, para este tipo de equipamento (empilhadeira), estão submetidas principalmente a tensões dinâmicas axiais que podem influenciar diretamente na falha dos seus elos, e como consequência no rompimento da sua seção.

Partindo do objetivo de obter os valores das tensões dinâmicas para análise, foram instrumentados 4 pontos da torre do equipamento, com um acelerômetro MPU6050 e os dados gerados enviados para um Arduino, desta forma, obtendo os valores das acelerações em tais pontos. Para o estudo, foi utilizado apenas o ponto 3 (na carga suspensa), pois as acelerações deste ponto foram suficientes para a análise proposta. Referente aos resultados é possível concluir que: O material que a corrente é fabricada corresponde ao aço SAE 1045, com uma microestrutura predominante de martensita revenida, possuindo uma dureza média de 44,5 HRc (média da dureza do pino e elo); A tensão cisalhante representa 30% da tensão normal, possibilitando analisar que as falhas provavelmente iniciam-se pelos elos. O que corrobora com o que já foi visto na prática, onde na maioria das falhas os pinos não rompem; As falhas provavelmente ocorrem sob a influência dos picos das tensões dinâmicas, geradas pelo perfil da pista que a empilhadeira opera. Uma vez que, o equipamento não possui um sistema de amortecimento dedicado a absorver estas acelerações; Após analisados os resultados, é sugerido que o caso com o carregamento de 1500 kg possui maior influência nas falhas, pois suas tensões dinâmicas são superiores às do caso sem carregamento; Foi possível identificar que a tensão dinâmica máxima, segundo os dados coletados, atingiu 98 % do valor estimado do limite de fadiga para o material. Sugerindo assim, que as falhas ocorram por fadiga acumulada, visto que, este pico não é atingido em outros momentos da análise. Parecendo assim que a vida desta corrente dependerá da quantidade de vezes que atingir este pico de tensão.

REFERÊNCIAS

ACELERÔMETRO e giroscópio MPU6050. [S.l.], 28 abr. 2015. Disponível em <<https://www.arduinoocia.com.br/2015/04/acelerometro-giroscopio-mpu-6050.html>> Acesso em: 22 março. 2019. Blog: Arduino e Cia.

BT, Manual de reparo pt, RRE140/160/180/200/250, 1ª revisão, São Paulo, 728p., publicação 20/01/2012

NORTON, Roberto L. Projeto de máquinas: Uma abordagem integrada. Tradução João Batista de Aguiar, José Manuel de Aguiar, Konstantinos Dimitriou Stavropoulos, Renato Machnievccz. 4.ed. Editora Bookmann, Porto Alegre. 2013

SAUR, Catálogo de garfos e tamanhos padrões, 2015, <<https://www.saur.com.br/pt/industrial/equipamentos-para-empilhadeiras-e-carregadeiras/garfos-e-prolongadores/m-garfos>> acesso em: 22 de maio 2019

SENAI. RS. Informações tecnológicas – Mecânica. 11. Ed. Porto Alegre: Diretoria de Educação e Tecnologia/Unidade de negócios em educação profissional, 2005. 267 p. il.

SOUZA, Anderson R. et al. A placa Arduino: uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC. Revista Brasileira de Ensino de Física, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <<http://sbfisica.org.br/rbef/pdf/331702.pdf>>. Acesso em 05 março. 2019.

TSUBAKI. 2011. Correntes de transmissão Tsubaki. Disponível em <<http://tsubaki.ind.br/wp-content/uploads/tsubaki/2012/09/Correntes-de-Transmissao-Portugues.pdf>>. Acesso em 08 setembro. 2018