

## MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE ELÁSTICA DE ROLOS DE IMPACTO APLICADOS EM CORREIAS TRANSPORTADORAS

**Jozias Marques<sup>1</sup>**

**Elvys Isaías Mercado Curi<sup>2</sup>**

**Resumo:** Os rolos de impacto aplicados em correias transportadoras são itens que reduzem as forças de impacto ocasionadas pela queda do material transportado e prevenindo a quebra prematura, prolonga a vida útil dos rolamentos e preserva a vida útil das correias. Existem métodos como o indicado na CEMA para a força de queda em um rolo de impacto, dentre as fórmulas do método se exige a constante elástica do rolo, valor específico de cada fabricante. O objetivo deste trabalho é encontrar a constante elástica, e estudar o comportamento com espessuras de borracha diferentes. Para avaliar tais resultados, foi desenvolvido uma bancada, que consiste em aplicar rolos de impacto revestido e sem revestimento e instalados sobre uma base fixa, e na parte superior e no centro do rolo há um sistema que permite a queda de uma massa de 3,588 kg sobre o rolo. A bancada foi instrumentada com sensores de aceleração e sensor de distância laser. Os ensaios consistem em elevar uma carga a diferentes alturas de queda, e os sensores coletam dados relacionados ao impacto. As respostas dinâmicas fornecem dados de vibração e amortecimento, onde posteriormente foram utilizados para calcular as forças resultantes e a constante elástica. Os rolos grande e pequeno apresentaram uma constante elástica semelhante variando entre 150 à 200 kg/cm, valor próximo de 200 e 178 kg/cm encontrados da CEMA e Rulmecca, o rolo pequeno apresentou uma variação excessiva devido o menor tempo de impacto ficando entre 160 à 290 kg/cm enquanto o rolo sem revestimento ficou entre 1000 à 1500 kg/cm valor também próximo de 1000 kg/cm da Rulmecca. Finalmente será possível dimensionar os rolos de impacto com a constante elástica que realmente representa o rolo.

**Palavras-Chave:** Correia transportadora, impacto, constante elástica, força de impacto.

### 1 INTRODUÇÃO

As correias transportadoras utilizadas na indústria para o transporte de grãos e minérios, exceto por projetos especiais, são sustentadas por rolos de aço com rolamentos. Como todo equipamento,

---

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Mecânica, ano: 2023. E-mail: joziasmarques@outlook.com

<sup>2</sup> Professor do Centro Universitário UniSATC E-mail: elvys.curi@satc.edu.br

existem condições de trabalho como impactos, vibrações e contaminações que afetam diretamente a vida útil dos equipamentos. Em determinados pontos do transportador, o índice de impacto é bastante elevado, embora sejam instalados rolos de impacto para amortecê-las, muitas vezes as cargas se manifestam com diferentes intensidades e frequências não previstas nos cálculos. Em decorrência disso, a capacidade local se modifica por completo, afetando o tempo de vida do equipamento. Por tanto, os rolos instalados nas denominadas áreas de carregamento, têm ao impacto como um fator importante a considerar no projeto. Nos cálculos de dimensionamento, se deve considerar estas condições dinâmicas, além de considerar uma apropriada constante elástica para atenuar os danos que ocasionam o impacto e as vibrações.

Os rolos de impacto aplicados nestas áreas, costumam receber um revestimento de borracha para reduzir a rigidez dos rolos. A maior parte da indústria procura aplicar rolos em que o revestimento atenda a norma ASTM D2000 M4 AA 617 A13 B13 K11 Z1. Ali se definem as características da borracha para estas aplicações como tensão de ruptura, dureza, condições de ensaio, além da abrasão e alongamento.

Atualmente, a constante elástica do rolo de impacto, também conhecida como coeficiente de rigidez, é um dado específico de cada fabricante, mas necessário para o dimensionamento mais preciso dos rolos, pois entre os modelos de cálculos, a constante aparece como uma variável fundamental.

Como o valor é desconhecido, em muitas ocasiões, o dimensionamento acaba por ser superestimado, gerando um custo mais elevado para a produção, tornando o rolo mais pesado, o que é um problema para o cliente, ou mesmo perdendo a venda por conta do preço. No pior dos casos, o oposto ocorre, o rolo é subestimado ocasionando a quebra prematura do produto, gerando danos e paradas não planejadas no transportador além de todo o transtorno de uma reclamação.

No carregamento temos ainda a variação da altura e tamanho do agregado, dificultando a determinação do impacto na correia. Estes dados por sua vez, são fundamentais para calcular a força de impacto e

consequentemente as vibrações transferidas aos rolamentos, conforme analisa o método de CEMA (2002).

O objetivo deste estudo é projetar uma bancada para avaliar as respostas dos rolos quando submetidos a impacto pontual. Por meio dos ensaios dinâmicos, são analisados os coeficientes dinâmicos e o comportamento da energia ao longo do tempo. Dessa forma, é possível estudar o comportamento dos rolos em relação ao impacto e aos testes de vibração. As respostas registradas do impacto nos rolos permitirão avaliar os principais parâmetros relacionados à capacidade de absorção de energia dos rolos, identificando a rigidez do produto para fins de dimensionamento.

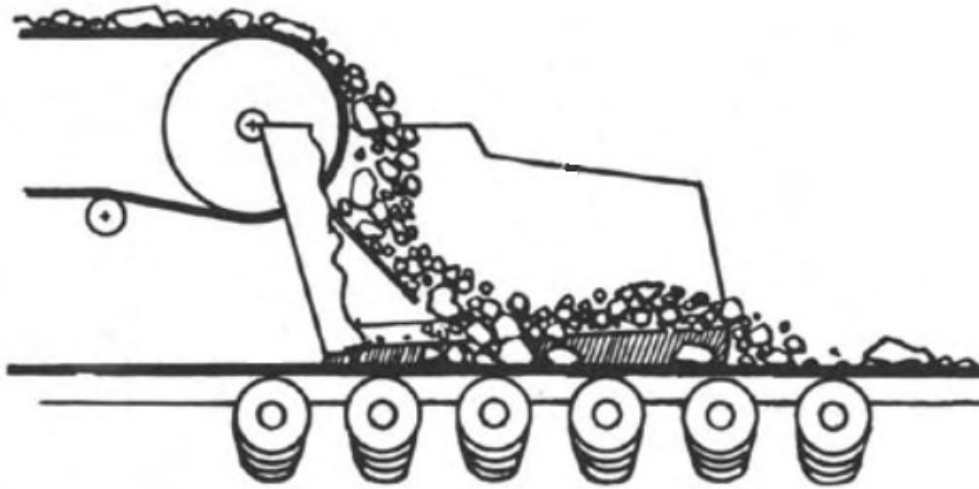
## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Os projetos de transportadores de correias são definidos pela norma ABNT NBR 6678 – 2017. Nesta norma, se encontra os modelos matemáticos para calcular as forças aplicadas ao equipamento, assim como, modelos para calcular as dimensões em tamanhos padronizados, complementando-se com recomendações de seleção de componentes.

### **2.1 ROLO DE IMPACTO EM CORREIAS TRANSPORTADORAS**

Os rolos de impacto aplicados em correias transportadoras têm por função principal absorver a energia de impacto no carregamento ocasionada pela queda do agregado, evitando uma sobrecarga nos rolamentos do rolo e na correia, podendo vir a criar danos na correia. Existem diversos dispositivos capazes de reduzir o impacto no carregamento sendo eles: a mesa de impacto, pneus pneumáticos e rolos revestidos com borracha. Este último é o estudo em questão (CEMA, 2014; BALIEIRO, 2019). A Fig. 1 apresenta o processo de carregamento sobre o transportador.

Figura 1 : Carregamento do transportador.



Fonte: GoodYear (s/d)

O rolo é constituído de um tubo em aço, com dois flanges soldados nas laterais. Os flanges servem como acoplamento do rolamento e vedação com graxa, com o objetivo de proteger os rolamentos de contaminantes, assegurando uma maior vida útil. Entre o tubo e os rolamentos passará um eixo, este é o que fica em contato com a estrutura do transportador. O corpo de aço é então revestido com anéis de borracha vulcanizada ou borracha vulcanizada direto no tubo.

Conforme a ABNT NBR 6678 (2017), a espessura recomendada para a borracha é de 25 mm, com uma dureza de 60  $\pm$  5 Shore A, tensão mínima de ruptura de 17 Mpa e alongamento mínimo de 400%, porém não indica de forma analítica ou empírica a justificativa destes valores.

### 2.1.1 Dimensionamento do rolo de impacto

O dimensionamento do rolo de impacto se assemelha ao rolo de carga normal, onde levamos em consideração a carga atuante no rolo mais solicitado. A norma ABNT NBR 6678 (2017) propõe a Eq. (1):

$$P_s = (k_{dc} \cdot P_a) + (q_c \cdot a_c \cdot g) + (m_{pm} \cdot g) + P_{rd} \quad (1)$$

Onde:

$P_s$  = carga atuante para a seleção do rolo (N);

$k_{dc}$  = coeficiente dinâmico para rolo de carga (---);

$P_a$  = carga no rolete (N);

$q_c$  = massa da correia por unidade de comprimento (kg);

$a_c$  = espaçamento entre rolos;

$m_{pm}$  = massa das partes moveis (kg);

$g$  = coeficiente de gravidade ( $m/s^2$ );

$P_{rd}$  = carga por desalinhamento da correia (N).

Desdobrando a carga no rolete ( $P_a$ ) temos a Eq. (2):

$$P_a = K_c \cdot q_m \cdot a_c \cdot g \quad (2)$$

Onde:

$K_c$  = coeficiente de carga para o rolo mais solicitado;

$q_m$  = massa do material transportado por metro linear.

De acordo com Rulli Rulmeca (2000), os cálculos dos rolos de impacto devem levar em consideração a força de impacto, que depende do tipo de fluxo que cai sobre rolo e somá-la com as demais forças da Eq. (1). Se o fluxo for contínuo, onde o agregado possui no máximo 50 mm temos a seguinte equação (CEMA, 2014, p. 106-107).

$$F_s = 0,123 \cdot Q \cdot H^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Onde:

$F_s$  = Força de impacto de fluxo de material a granel (kgf);

$Q$  = Fluxo do material contínuo (t/h);

$H$  = Altura de impacto (m).

Já para agregados maiores e um fluxo não homogêneo temos (CEMA STANDER, 2014):

$$F_L = W + (2 \cdot k \cdot W \cdot H)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Onde:

$F_L$  = força de impacto de agregado único (kgf);

$W$  = peso do material (kg);

$k$  = constante elástica (kg/cm);

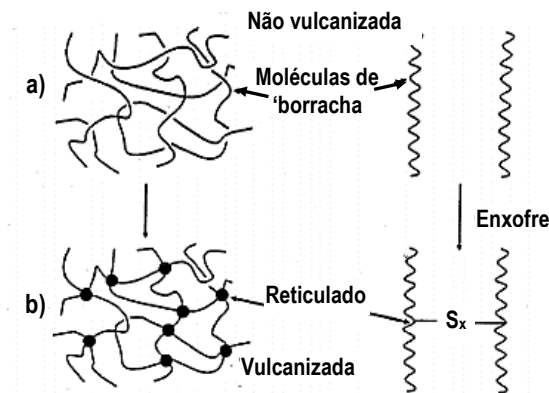
$H$  = altura de impacto (m).

O foco do estudo é sobre a constante  $k$ , no qual o valor está diretamente ligado a estrutura do rolo que receberá o impacto, e neste quesito, a borracha que reveste o rolo, tem grande importância no conjunto. Devido à geometria complexa, somada às propriedades dinâmicas dos diferentes materiais, é necessário identificar a influência da borracha no valor do coeficiente de elasticidade  $k$ .

### 2.1.2 Efeitos da borracha no rolo

A borracha natural é extraída da *Hevea Brasiliensis* ou látex coagulado. Esta é submetida a um processo chamado de vulcanização, que consiste em elevar sua temperatura para misturá-la com enxofre. Deste modo se provoca uma ligação molecular chamada de ligação cruzada. Este processo torna o emaranhado de cadeias moleculares mais rígidas e com graus de liberdade menores à borracha não vulcanizada. Desta forma, quando a borracha é alongada por uma determinada força, após cessar, tende a retornar a sua posição inicial (SOUZA, 2013). A Fig. 2 mostra a diferença entre uma borracha sem e com vulcanização.

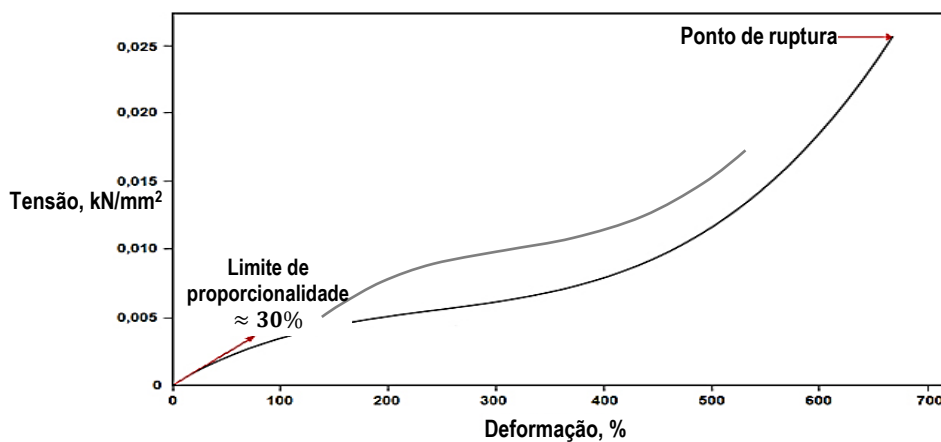
Figura 2: Cadeias da borracha a) sem vulcanizar b) vulcanizada.



Fonte: SOUZA (2013)

Ao observar as propriedades mecânicas de tensão deformação de um aço, temos um gráfico onde a característica elástica possui uma reta bem definida, expressando sua proporcionalidade. Esta característica não ocorre nas borrachas vulcanizadas, já que não possui a proporcionalidade, sendo necessário determinar o seu módulo de elasticidade para cada porcentagem de alongamento (CAETANO, s.d.). A Fig. 3 mostra o comportamento da borracha em função da deformação e sua tensão.

Figura 3: Curva de tensão deformação de uma borracha vulcanizada

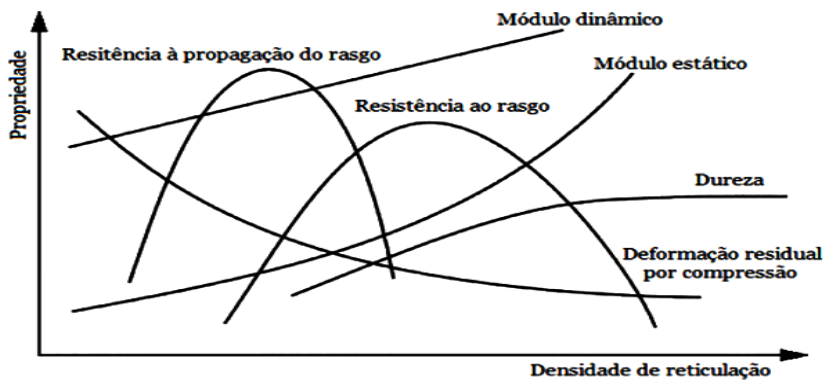


Fonte: CAETANO (s.d.)

Este é um dos principais fatores que proporcionaram a combinação de rolos de carga com revestimento de borracha vulcanizada. Esta característica de deformação absorve grandes quantidades de energia mantendo a integridade do rolo e correia.

Propriedades de dureza, resiliência, resistência à propagação de rasgos entre outras tem um comportamento não linear se forem avaliadas com relação à densidade de reticulação (Caetano, s/d). A Fig. 4 mostra o comportamento de correlação das propriedades da borracha.

Figura 4: Comportamento das propriedades em função da densidade de reticulação.



Fonte: CAETANO (s.d.)

## 2.2 AMORTECIMENTO

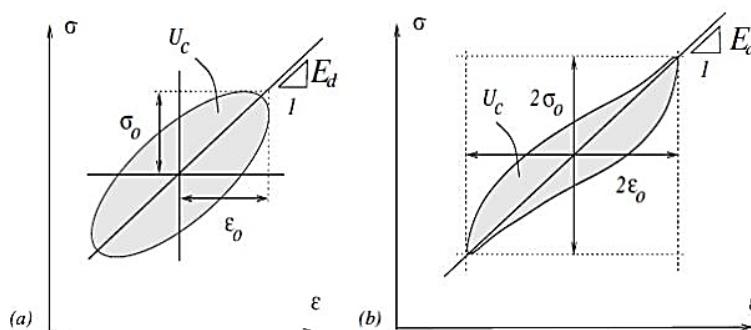
Para o estudo do amortecimento, existem diferentes métodos e tipos de amortecimentos a serem considerados, de modo geral, os cálculos envolvem geometrias conhecidas e situações controladas, o que em uma situação real envolve diversas variáveis e geometrias complexas e muitas vezes propriedades desconhecidas dos materiais.

Dentro de um sistema amortecido, existem duas principais formas de encontrar a energia dissipada sendo o amortecimento interno e o amortecimento estrutural.



O amortecimento interno está correlacionado à estrutura molecular do material, como impurezas, granulometria e defeitos na microestrutura Masoti (2013). Os materiais apresentam o conhecido gráfico tensão-deformação onde se caracterizam pela formação de uma histerese referente à dissipação de energia. A Fig. 5 apresenta dois comportamentos diferentes avaliados com os parâmetros de tensão e deformação.

Figura 5: Tensão e deformação de polímeros deformáveis. a) simétrico; b) não simétrico.



Fonte: SOUZA (2013)

Na Fig. 5, se observa o comportamento da histerese dos materiais de borracha. A área  $U_c$  é a representação da energia dissipada pelo material, geralmente em forma de calor, apresentado o amortecimento em (a) linear e em (b) não linear. As variações apresentadas no gráfico não linear ocorrem por conta de rompimentos no enchimento do material, comportamento ocasionado em borrachas sendo o mais adequado para sua utilização.

Além disso a borracha possui um comportamento viscoelástico, ou seja, uma mistura entre o comportamento elástico e o comportamento viscoso, o primeiro se deforma rapidamente após aplicação de tensão e retorna totalmente ao seu estado original, enquanto o outro possui um retardo de resposta devido ao atrito interno e não retorna por completo Souza (2013).

Os rolos de impacto são constituídos de dois materiais, aço e borracha, a histerese é muito mais significativa na borracha do que no aço.

Já o amortecimento estrutural está relacionado ao atrito entre partes móveis como juntas parafusadas, deflexão e articulações. Quando obtido através de ensaios, tem-se o amortecimento total do sistema sendo necessário descontar o valor do amortecimento interno que ocorre em sua maior parte na borracha, e o restante da energia é absorvida pela estrutura do rolo.

### 2.3 MÉTODOS PARA DETERMINAR A FORÇA DE IMPACTO E A CONSTANTE ELÁSTICA

Usou-se no trabalho dois métodos para encontrar as forças de impacto e apenas um para a constante elástica. O primeiro é baseado no conceito de conservação de energia enquanto a outra é através do movimento oscilatório após impacto. Já para a constante elástica foi usado o conceito de lei de Hooke.

#### 2.3.1 Método pela conservação de energia e lei de Hooke

Conforme Aranha et al. (2016), a definição de constante elástica é dada pelo fator força aplicada x deslocamento, em uma condição estática é tecnicamente simples, porém para situações dinâmicas e com materiais de comportamento não linear como neste caso, tornam este tipo de ensaio mais complexo. A começar pela força que é variável dependendo da altura de queda, dado necessário para encontrar a velocidade inicial do impacto. Silveira (2013) diz que para encontrar a força é necessário determinar o deslocamento de impacto, e a partir deste deslocamento encontra-se também a constante elástica conforme equação abaixo:

$$F = \frac{m \cdot v^2}{2x} \quad (06)$$

Onde:

$F$  = força de impacto (N);

$m$  = massa do corpo de impacto (kg);

$x$  = Deformação do corpo impactado (m);

$v$  = Velocidade de impacto (m/s).

O cálculo da constante elástica se determina pela Eq. (7):

$$k = \frac{F}{x} \quad (07)$$

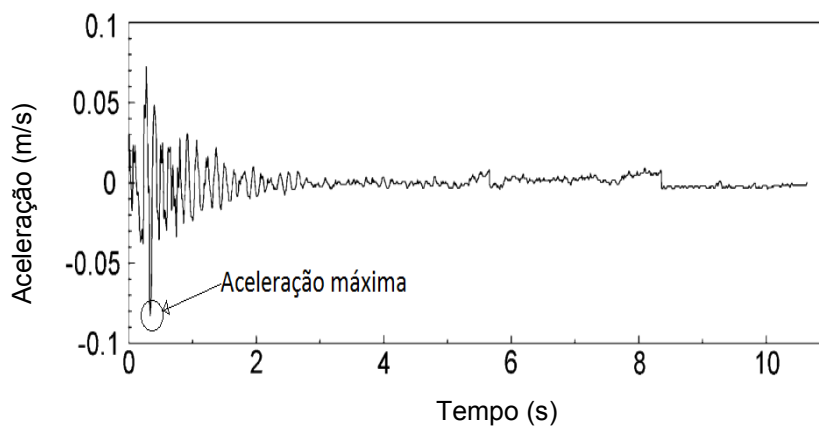
Onde:

$k$  = Constante elástica (kg/m).

### 2.3.1 Método pelo movimento oscilatório

Todos os corpos possuem em algum nível um movimento oscilatório que apresenta uma grandeza física cinemática do quão rápido um corpo se move ao longo de tempo conforme Rocha (2013). Em alguns casos o modelo viscoso de amortecimento após algum impacto pode ser notado segundo Masotti (2013). Com um acelerômetro conectado ao corpo, o acelerômetro retorna um sinal oscilatório das amplitudes do movimento em  $m/s^2 \times$  tempo.

Figura 6: Sinal oscilatório de impacto disposto graficamente em aceleração x tempo.



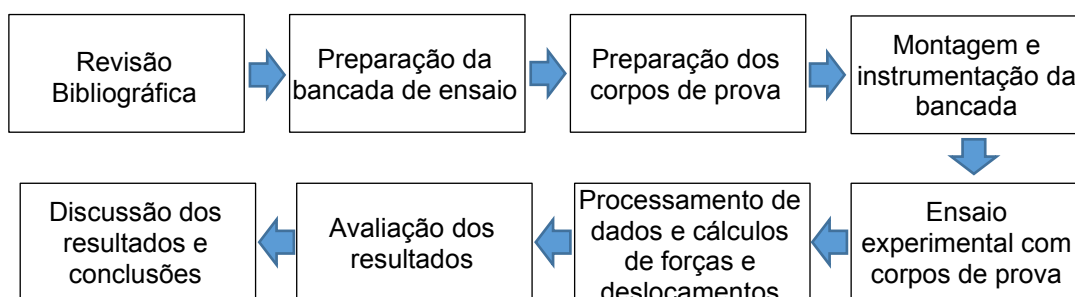
Fonte: Adaptado de Boore e Bommer (2004)

Aplicando a segunda lei de Newton dado  $F=m \cdot a$ , baste conhecer a massa e interceptar o pico de aceleração máximo obtida e aplicar na equação em questão e se encontra a força estimada do impacto.

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O estudo do comportamento dos rolos de impacto usados em correias transportadoras, onde o rolo é submetido ao impacto de carregamento, requer ensaios experimentais. Foram escolhidos alguns rolos, com as dimensões convencionais usadas nas correias transportadoras. Foram preparados 4 tipos de rolos com o mesmo dimensional exceto pelo revestimento, sendo: 3 revestidos com uma camada de borracha de 15mm ao denominado rolo pequeno, 25mm ao rolo médio, 40mm ao rolo grande e um sem revestimento. O revestimento utilizado possui as mesmas propriedades mecânicas para ambos com dureza de  $65 \pm 5$  Shore A e alongamento mínimo de 400%. Os rolos foram submetidos a cargas graduais de impactos, e por meio de instrumentos instalados na bancada, se extraiu as informações que permitiram avaliar a influência das borrachas, em função das cargas de impacto submetido. Finalmente se estabelece uma relação de espessuras que se relacionam com as propriedades das borrachas em função das cargas testadas. A Fig. 7 apresenta a sequência do procedimento do ensaio.

Figura 7: Fluxograma das atividades do procedimento experimental



Fonte: Do Autor (2023)

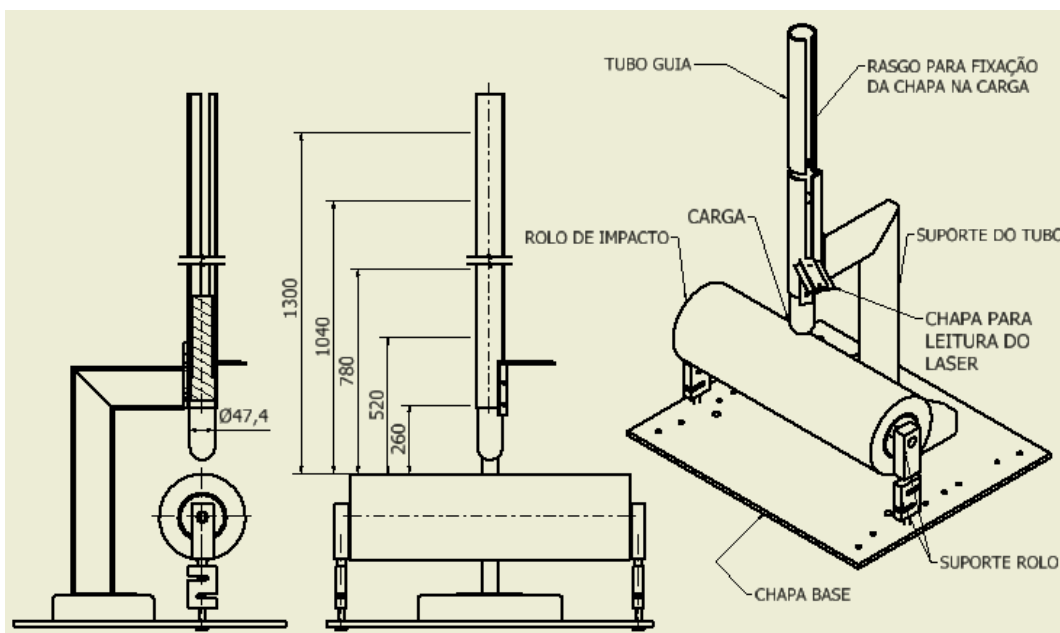
### 3.1 BANCADA DE ENSAIO

A bancada é composta por uma base de 9,52 x 454 x 520 mm que está fixada por parafuso no piso. Um suporte é parafusado a base e neste suporte é fixado o tubo que servirá como guia para o peso que simula o agregado em queda livre.

O procedimento dos ensaios foi planejado da seguinte maneira: a carga foi elevada 3 (três) vezes a 5 alturas diferente intercaladas igualmente. Tal repetição foi executada para garantir que se consiga o ponto mais baixo do impacto.

A Fig. 8 mostra o projeto da bancada para realizar os ensaios de impacto nos rolos corpos de prova.

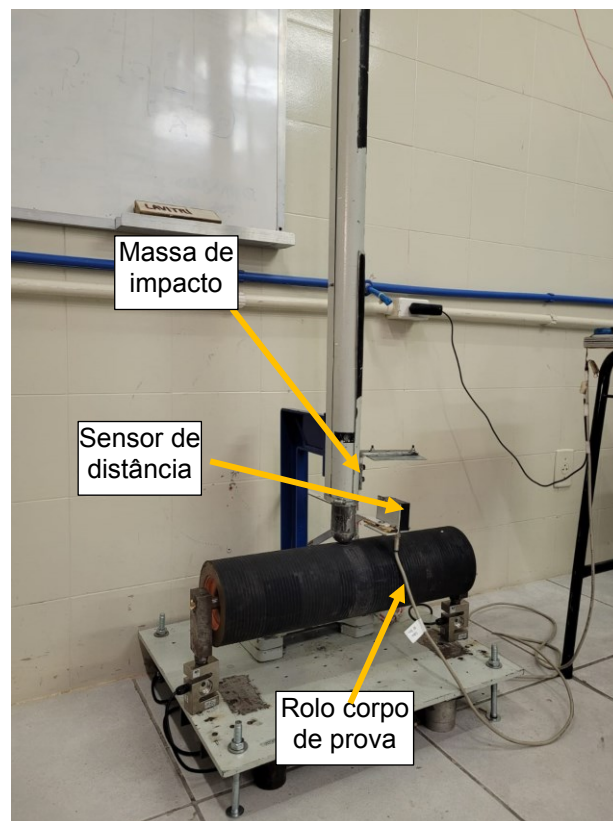
Figura 8: Detalhamento 2D com as dimensões da altura do ensaio.



Fonte: Do Autor (2023)

Após o projeto 3D e o detalhamento 2D iniciou-se o processo de fabricação e montagem. A Fig. 9 apresenta uma foto da bancada instalada no laboratório Lavitri, com o sensor de distância posicionado.

Figura 9: Bancada fabricada e montada.



Fonte: Do autor (2023)

A base foi posicionada bem próxima a parede onde foi fixado uma mão francesa que serviu como suporte para fixar o sensor óptico, desta forma, a vibração do impacto não afetou a leitura do sensor de forma significativa.

A carga possui 3,588 kg e é erguida por uma corda que entrepassa por uma roldana fixada em duas mãos francesas presa na parede. Na lateral do peso há uma chapa parafusada utilizada para detecção de movimento pelo sensor de distância.

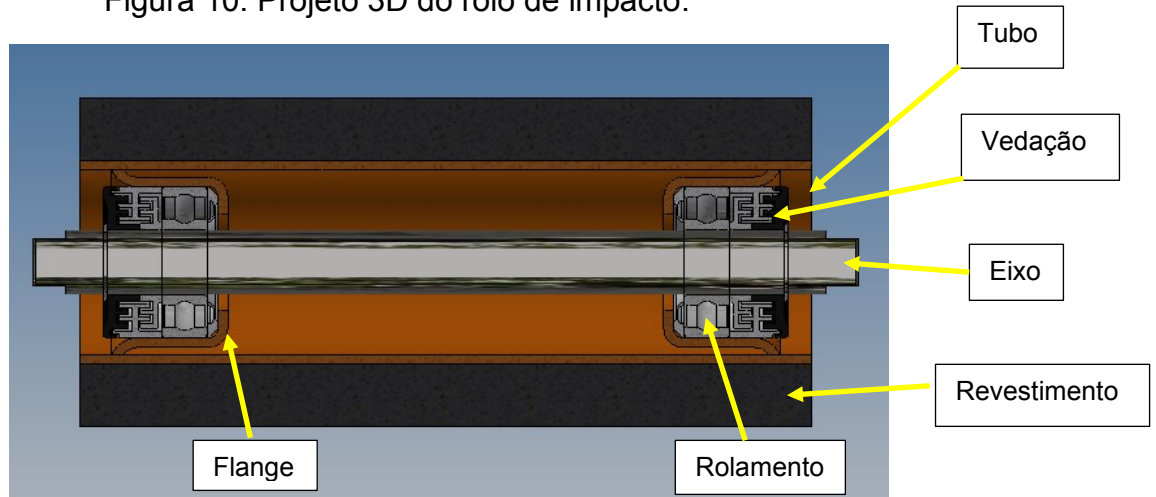
### 3.2 ROLO DE IMPACTO

Na sua grande maioria, os rolos são constituídos por um tubo de aço SAE 1020, os eixos em SAE 1020 ou 1045, acoplados estão os flanges de aço SAE 1020 ou semelhante, dentro destes os rolamentos comerciais como SKF, NSK, FAG, entre outros. Também há um sistema de vedação a

frente dos rolamentos. Como o trabalho se concentra em rolos de impacto, temos ainda o revestimento em borracha vulcanizada.

O projeto do rolo de impacto é mostrado na Fig. 10, e na Fig. 11 se apresenta os rolos de impactos usados nos ensaios.

Figura 10: Projeto 3D do rolo de impacto.



Fonte: Do Autor (2022)

Como o sistema de vedação não exerce nenhum tipo de resistência mecânica significativa, as amostras foram produzidas sem vedação. Abaixo temos a Fig. 11 dos rolos após a produção, todos eles possuem a mesma característica dimensional, exceto o revestimento.

Figura 11: Rolos produzidos para o ensaio.



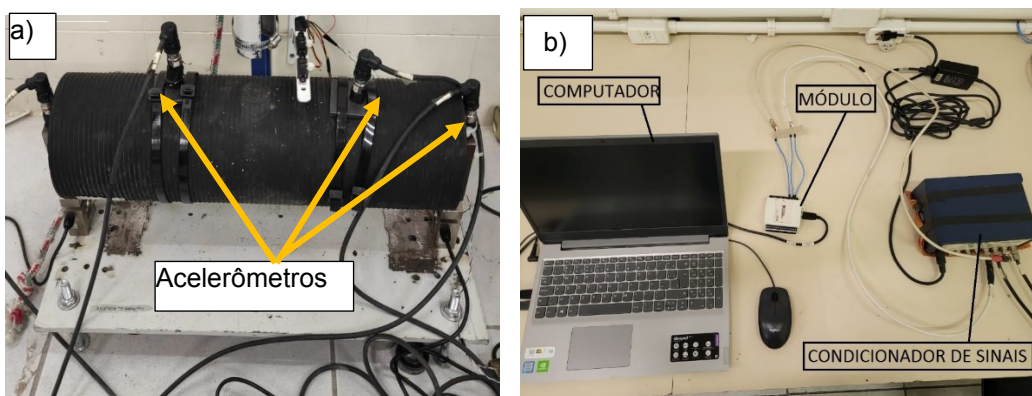
Fonte: Do Autor (2022)

### 3.3 MONTAGEM E INSTRUMENTAÇÃO DA BANCADA

Quatro acelerômetros foram usados para coletar sinais de aceleração, cujos sensores piezoelétricos da marca PCB, modelo 603C01 foram conectados ao condicionador de sinais modelo 480C02, que passam pela placa analógica *Nationals Instruments* modelo USB-6009 e são coletadas por um computador através do software *LabView*. Dois destes acelerômetros foram posicionados sobre o suporte do rolo e dois sobre a borracha com auxílio de uma cinta plástica e uma chapa metálica que serviram como base dos acelerômetros.

A Fig. 12 mostra a instalação dos acelerômetros e os instrumentos que complementam a instalação dos sensores.

Figura 12: Instalação dos sensores a) Posicionamento dos acelerômetros sobre o rolo; b) Instrumentos para coleta de dados.



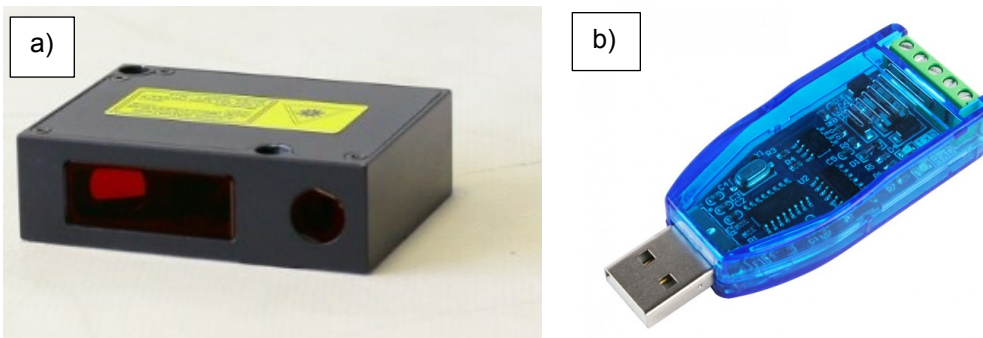
Fonte: Do Autor (2023)

Referente ao sensor óptico modelo RF603, o componente possui um range de medição de 100 mm iniciando em 60 mm até 160 mm, além disso, proporciona uma conexão serial que para ser lido através de uma porta USB do computador é necessário um conversor serial, o dispositivo utilizado foi o ZK-U485.

O sensor de distância analógico digital RF603 conectado por meio de um USB é apresentado na Fig. 13.



Figura 13: Sensor de medição de distância a) sensor RF603; b) conversor de sinal serial para USB.

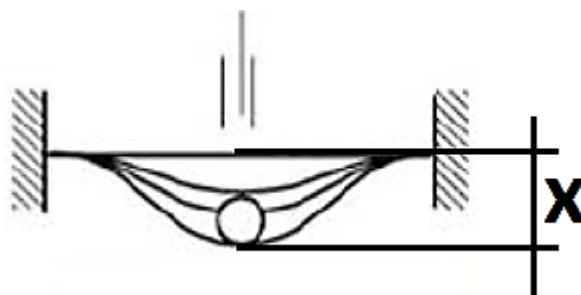


Fonte: Riftek (2023); Usinainfo (2023).

### 3.4 ENSAIO DE IMPACTO

Foram realizadas medições de força, aceleração e posição do corpo de impacto, no ponto exato em que a carga chega à velocidade 0 m/s, ou seja, o deslocamento total do início até parar por completo conforme demonstrado na Fig. 14.

Figura 14: Deslocamento de impacto.



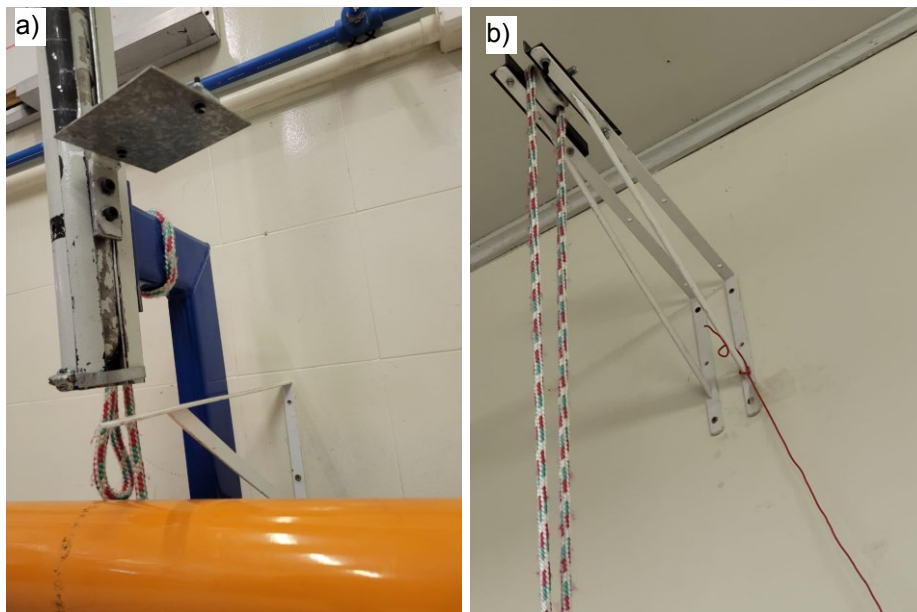
Fonte: Adaptado de Biase (2009)

Devido à alta velocidade no início do impacto, a coleta de dados requiriu de sensores com alta sensibilidade e rápida resposta, por isso, foi utilizado um sensor óptico com capacidade de até 9400 Hz, este sensor medirá o deslocamento mais próximo possível da carga. Além disso, foram instalados acelerômetros posicionados em dois pontos diferentes que forneceram dados de aceleração onde calculou-se a força de impacto e são

comparados com os resultados de força pelo deslocamento, do mesmo modo permitem determinar a constante elástica.

Detalhes da bancada e seu sistema de medição de distância são mostrados na Fig. 15.

Figura 15: a) mão francesa fixada na parede e servindo de suporte para o sensor; b) mão francesa utilizada para suporte da roldana.



Fonte: Do Autor (2023)

Existem alguns parâmetros medidos na bancada que não foram os calculados, já que algumas interferências afetam a precisão dos resultados, como o atrito entre a carga e o tubo reduzindo a velocidade em queda livre, a corda utilizada para erguer a carga, mesmo que leve, exerce uma função de contrapeso e por último e mais relevante, a capacidade de coleta de dados do sensor.

Para atingir a taxa de saída de 9400 Hz velocidade máxima do sensor, é necessário parametrizá-lo a uma taxa de Baud de 460800 bits/s de acordo com a equação fornecida pelo manual. Porém, para fazer a conversão de dados seriais característicos do sensor para USB e utilizar o computador para leitura de dados é necessário um dispositivo específico, contudo o que se tinha a disposição suportava no máximo 115600 bits/s e assim foi atingido a frequência de 2551 Hz.

A taxa de saída se calcula com a Eq. (8):

$$TAXA DE SAÍDA = \frac{1}{\left(\frac{44}{BR} + 1 \cdot 10^{-5}\right)} Hz \quad (8)$$

Onde:

$BR$  = taxa de Baud (bits/s).

Para fazer a leitura de dados do sensor, o fabricante disponibilizou um *software* próprio do sensor RF60x, onde foram configurados alguns parâmetros para adequar o ensaio ao objetivo do trabalho.

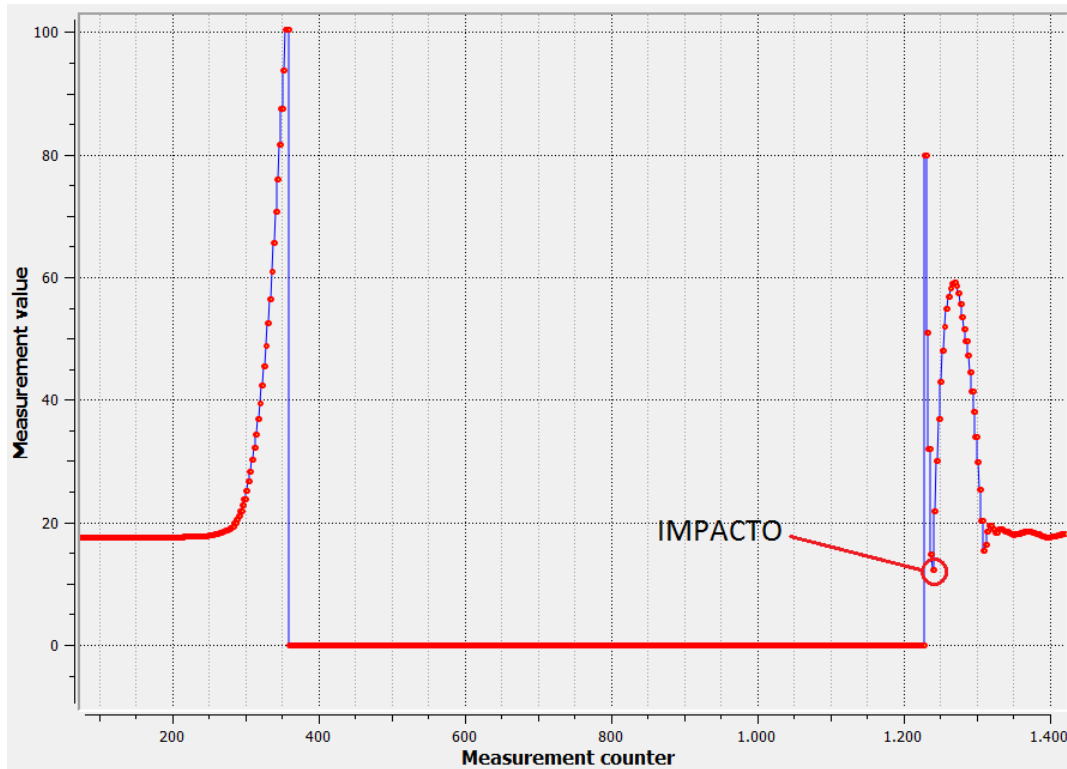
Ao executar o ensaio, o programa exhibe simultaneamente a posição da carga até o fim do ensaio, onde gera um gráfico com as posições e permite exportar um arquivo .CSV apenas com as coordenadas de pontos coletados e a posição da carga em cada um.

Como o *software* não permitia parametrizar intervalos de tempo iguais entre cada ponto de coleta, utilizou-se como auxílio o programa *Autoclick* que permite habilitar um intervalo de tempo a cada *click* do *mouse*. desta forma, foi configurado um tempo de 10 segundos para todos os ensaios que posteriormente foram utilizados para determinar qual configuração resultava no maior número de pontos possíveis.

O processamento de dados das forças e acelerações, se realizou utilizando o *software* de *Excel*®, depois de filtrar alguns sinais, e repetir várias vezes os ensaios.

A Fig.16 demonstra graficamente como ocorre o ensaio, desde o início onde a carga é elevada até o momento em que atinge o rolo e cessa o movimento sobre ele. Como mencionado no item 3.1, o objetivo foi encontrar a diferença entre o ponto de impacto e a posição inicial da carga, esta variação representa o amortecimento de impacto.

Figura 16: Gráfico do sensor óptico RF60x mostrando o momento em que a carga é elevada ao ponto onde o sensor perde o alcance e o momento em que retorna até ocorrer o impacto.



Fonte: Do Autor (2023)

Após a realização dos ensaios e exportado em .CSV, uniu-se todos esses dados em uma única planilha de *Excel* onde foi plotado o gráfico e encontrado o menor valor em mm do momento de impacto e aplicado as Eq. 6 e 7.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta etapa serão apresentados os resultados dos ensaios anteriormente comentados.

### 4.1 COLETA DE DADOS E CÁLCULOS

Após ter realizado os ensaios, criou-se uma tabela com os valores obtidos de  $\Delta x$  citado no item 4.1 e, a partir deste, foi aplicado os demais cálculos de velocidade, força e constante elástica. Abaixo temos um exemplo da tabela criada para cada rolo.

Tabela 1 - Coleta de dados do rolo grande com 40 mm de revestimento.

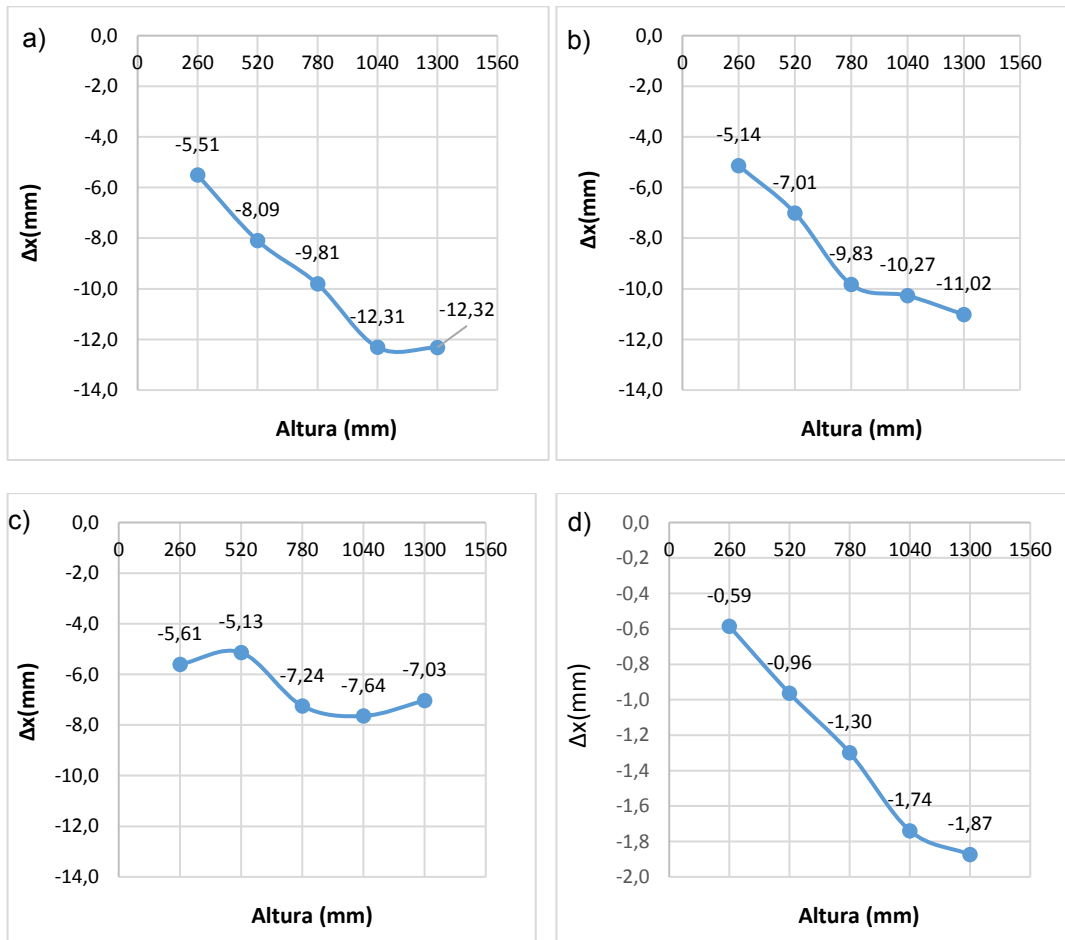
Nº	Altura(mm)	$\Delta x$ (mm)	V(m/s)	F(kg)	k(kg/cm)
1	260	-6,10	2,26	133,12	149,11
<b>2</b>	<b>260</b>	<b>-6,54</b>	<b>2,26</b>	<b>124,30</b>	<b>139,22</b>
3	260	-5,51	2,26	147,58	165,31
1	520	-7,15	3,19	227,36	180,08
<b>2</b>	<b>520</b>	<b>-8,09</b>	<b>3,19</b>	<b>200,78</b>	<b>159,03</b>
3	520	-7,65	3,19	212,48	168,29
1	780	-6,35	3,91	383,63	248,09
2	780	-8,01	3,91	304,39	196,84
<b>3</b>	<b>780</b>	<b>-9,81</b>	<b>3,91</b>	<b>248,51</b>	<b>160,71</b>
1	1040	-9,36	4,52	347,12	194,40
2	1040	-8,37	4,52	388,11	217,36
<b>3</b>	<b>1040</b>	<b>-12,31</b>	<b>4,52</b>	<b>264,00</b>	<b>147,85</b>
1	1300	-6,96	5,05	583,35	292,21
2	1300	-11,83	5,05	343,45	172,04
<b>3</b>	<b>1300</b>	<b>-12,32</b>	<b>5,05</b>	<b>329,831</b>	<b>165,22</b>

Fonte: Do autor (2023)

Conforme comentado no item 4.1, a carga cai em alta velocidade, resultando em um baixo tempo de proporcionando uma certa variação de profundidade nos três ensaios de cada altura, mas como a velocidade no início do impacto é igual para os testes, permitiu-se utilizar os ensaios com maiores deslocamentos.

A Fig. 17 resume os ensaios de deslocamento da superfície do rolo ou deformação deste em função da altura da carga.

Figura 17: Deslocamento de impacto. a) Rolo grande; b) Rolo médio; C) Rolo pequeno; d) Rolo sem revestimento.



Fonte: Do autor (2023)

Coerentemente, a profundidade de impacto aumenta conforme a altura de queda, contudo, o rolo pequeno com apenas 15 mm de revestimento, apresentou valores que não correspondem com a realidade nas quedas de 520 mm e 1300 mm, visto que o deslocamento de uma altura maior exige pelo menos, o mesmo valor a altura anterior. Isto ocorreu devido ao baixo tempo de impacto já que ele possui menos borracha e consequentemente amortece menos.

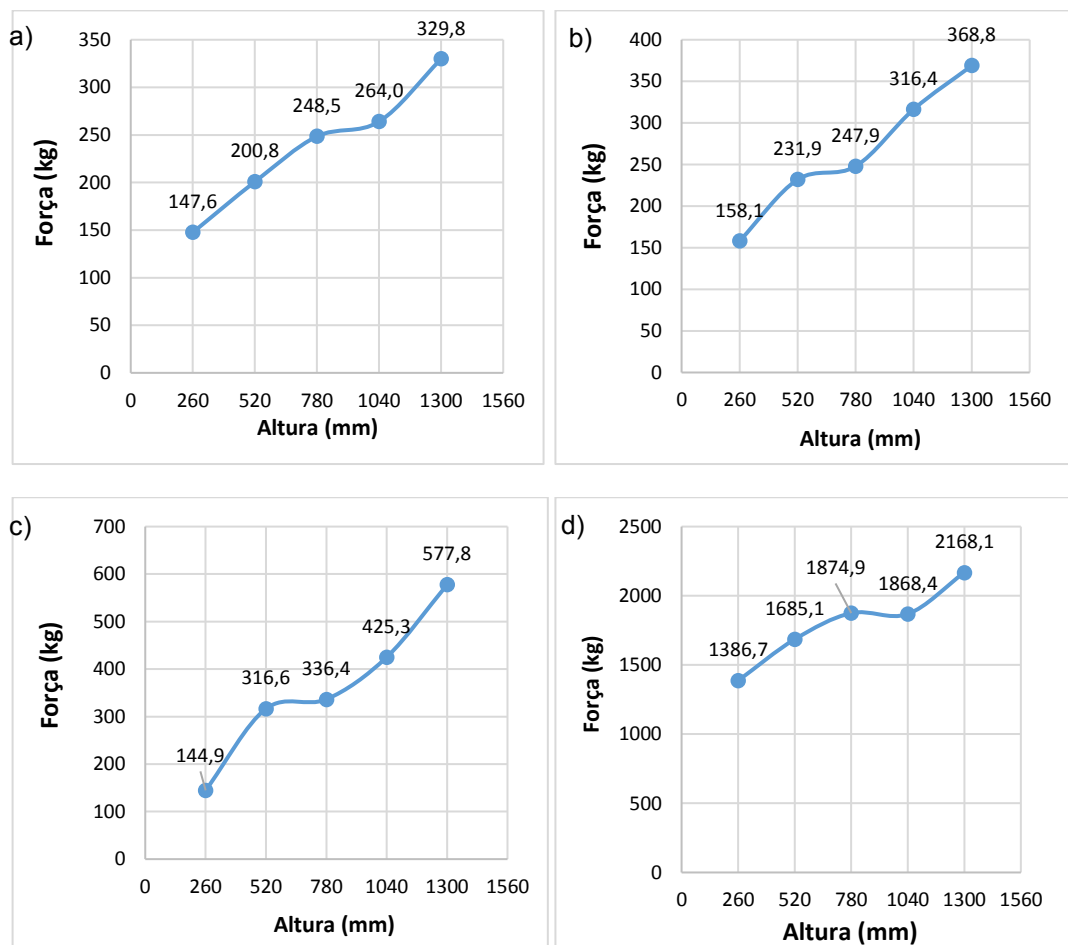
#### 4.2 FORÇA DE IMPACTO

Encontrar as forças resultantes decorrente do impacto permite avaliar o quão maléfico será para o transportador o material despejado e sua

altura, além disso, destaca-se que o método utilizado pode ser comparado ao método utilizado pela CEMA e demais fabricantes.

A Fig. 18 resume os ensaios de força de impacto no rolo em função da altura da carga.

Figura 18: Força de impacto obtido através do sensor de distância. a) Rolo grande; b) Rolo médio; c) Rolo pequeno; d) Rolo sem revestimento.



Fonte: Do autor (2023)

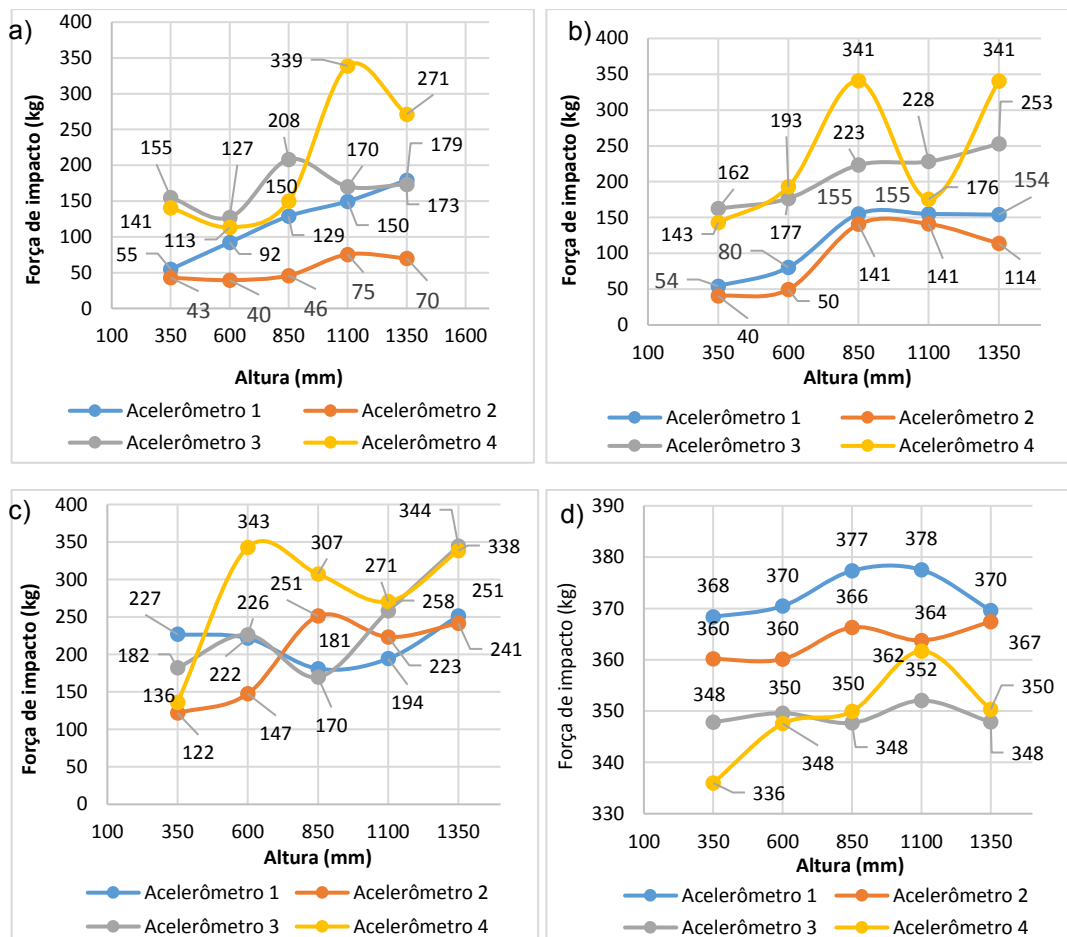
A Fig. 18 expressa os resultados obtidos através da Eq. 6 que demonstra claramente a diferença das reações entre os rolos ensaiados.

Como já era esperado, a força de impacto foi maior à medida que a espessura do revestimento reduziu, tornando assim mais evidente a eficácia quando comparada ao rolo sem a borracha.

Para efeito de comparação, foi dispostos as forças resultantes através dos acelerômetros posicionados em locais diferentes.

A Fig. 19 apresenta os resultados obtido pelos acelerômetros medidos na superfície do rolo em função da altura que foi liberado a carga.

Figura 19: Força de impacto dos acelerômetros 1, 2, 3 e 4. a) Rolo grande; b) Rolo médio; c) Rolo pequeno; d) Rolo sem revestimento.



Fonte: Do Autor (2023)

Estes ensaios foram feitos separadamente do ensaio com o sensor a laser e por falta de tempo hábil não foi possível repeti-lo com as mesmas alturas de queda livre. Apesar disso, as forças resultantes nos acelerômetros 3 e 4 se assemelham com o método do sensor a laser, já que como estavam posicionados em uma região metálica foram capazes de captar a vibração.

Já para os acelerômetros 1 e 2 que estavam posicionados sobre a borracha, os dados resultaram em forças inferiores pois parte da vibração foi absorvida pela borracha. Contradizendo os gráficos a), b) e c), o item d)

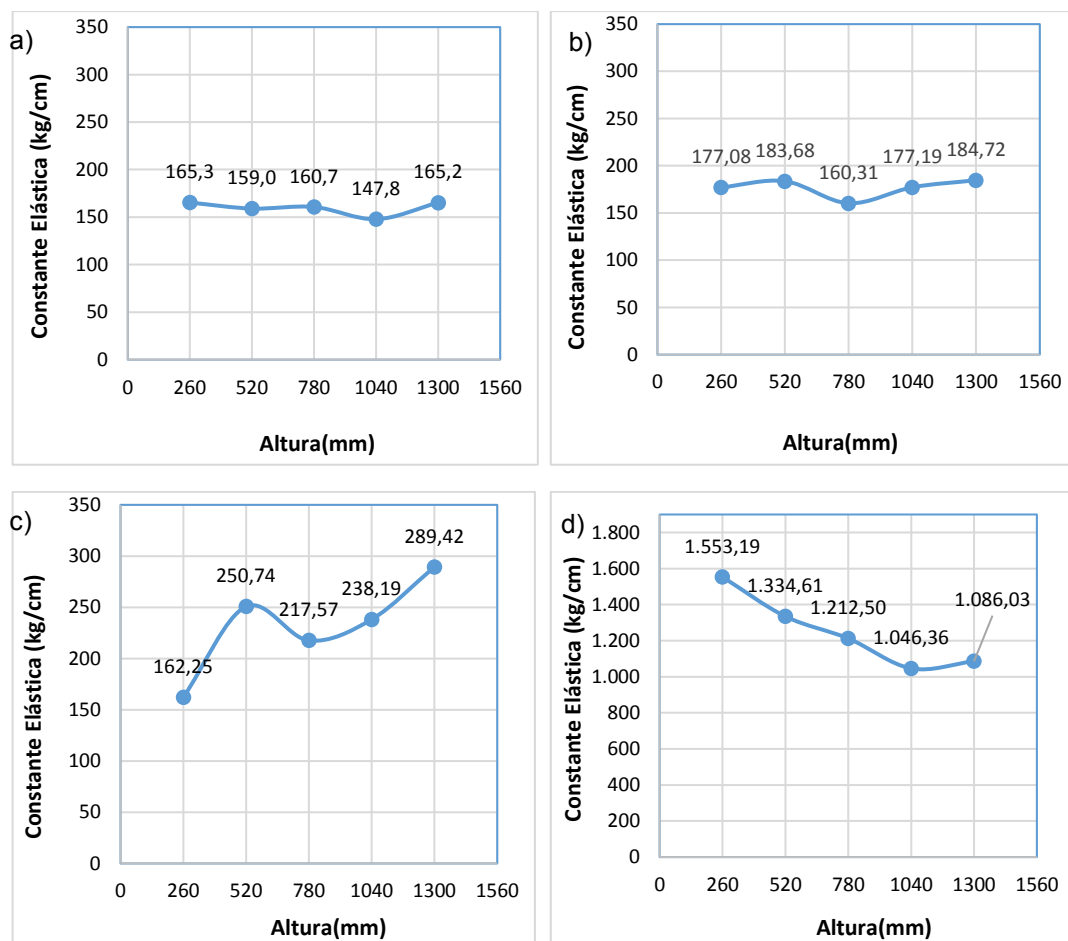


se comportou de maneira contrária indicando maior força de impacto nos acelerômetros 1 e 2, efeito ocasionado pelo fato deles estarem posicionados na superfície metálica pois o rolo não possui revestimento.

### 4.3 CONSTANTE ELÁSTICA

Por fim, a constante elástica, foco principal do estudo para fins de dimensionamento e introduzida na Eq. 4, viabilizou a determinação da força resultante pelo método CEMA. A Fig. 20 apresenta valores da constante elástica calculado com os ensaios experimentais.

Figura 20: Constante elástica. a) Rolo grande; b) Rolo pequeno; c) Rolo médio; d) Rolo sem revestimento.



Fonte: Do Autor (2023)

O rolo grande e o médio apresentaram um comportamento quase constante variando a constante elástica de 150 a 200 kg/cm, mas o rolo de maior revestimento apresentou valores menores na média de 159,6 kg/cm enquanto o rolo médio de 176,6 kg/cm.

Já para o rolo menor houve grande variação na faixa de 160 a 290 kg/cm, reflexo do deslocamento de impacto mostrado na Fig. 17. Por fim temos o item d) representando o rolo sem revestimento, apresentando variação de 1000 a 1600 kg/cm apresentando uma queda constante.

Os itens a), b) e c) da Fig. 20 foram satisfatórios pois apresentaram constantes elásticas semelhantes com as referências encontradas na CEMA de 178,6 kg/cm para rolo revestido na Rulmeca de 200 kg/cm para rolo revestido e 1000 kg/cm para rolo sem revestimento.

## **5 CONCLUSÕES**

Os resultados se mostraram confiáveis visto que ao comparar com as referências conhecidas os valores se mostraram semelhantes, mesmo que se desconheça os métodos utilizados e as dimensões construtivas. Foi possível averiguar a influência da borracha sobre a capacidade de amortecimento de impactos e a relevância da espessura adequada.

Notou-se que a partir de uma determinada espessura de borracha a capacidade de amortecimento se torna menos significativa, assim, como o revestimento de um rolo representa um custo alto não se justifica exceder a camada de borracha acima de 25 mm, já que este proporciona um bom argumento que não tinha conhecimento.

Graças aos bons resultados, será possível realizar o dimensionamento dos rolos de impacto com valores mais coerentes aos que estavam sendo utilizados, pois a constante elástica encontrada é de fato o valor real dos produtos e é menor, o que significa que rolo amortece mais do que se esperava, desta forma, proporcionando maior confiança do fornecimento e maior retorno financeiro alcançado pela redução de custo seja por superdimensionamento ou por subdimensionamento.

Os resultados não são isentos de alguma imprecisão, já que para isso, todos os ensaios devem resultar no mesmo valor repetidas vezes. A repetibilidade está diretamente relacionada à precisão de medição. Seria possível ainda aplicar alguns métodos estatísticos para consolidar ainda mais os resultados.

A bancada em si apresentava partes folgas como a guia da carga no momento do impacto acaba vibrando, a corda que eleva a carga altera a velocidade de queda, o atrito com o tubo que também reduz a velocidade e, por fim, a troca do conversor por um de maior capacidade.

## REFERÊNCIAS

ABNT NBR 6678:2017, transportadores contínuos – Transportadores de correia – Roletas – Projeto, seleção e padronização. 3. ed. 2017. Rio de Janeiro: 2017 81 p. ISBN 978-85-07-07180-8.

ARAVANIS, Alexandros Evangelu. Efeito do Sistema de Reticulação nas Propriedades de Composto de Borracha Natural para Peças de Engenharia do Setor Automotivo. 2006. Dissertação (Mestrado) – Ciência e Tecnologia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ARANHA, Norberto., OLIVEIRA, José., BELLIO, Luis. e Bonventi, Waldemar. (2016). A lei de Hooke e as molas no-lineares, um estudo de caso Revista Brasileira de Ensino de Física, Volume (38), 1-10. <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0102>.

ARNOLD, Francisco., GODENY, Alan., COSTA, Murilo., VIANA, João. e XIMENES, Ximenes. (2017). Proposta experimental do estudo de colisões entre bolas de borracha e superfície plana. Revista Brasileira de Ensino de Física, Volume (40), 1-9. <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-014>.

ASTM, Standard Classification System for Rubber Products in Automotive Applications. 8. ed, 2008.

BALIEIRO, Ricardo Luís. Desenvolvimento de abordagem baseada em técnicas de visão computacional e de aprendizado de máquinas para monitoramento e controle de falhas em correias transportadoras. PhD Tese

(Doutorado) – Curso de Ciências, Programa de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo. 2019.

BOORE, D.M.; BOMMER, J.J. Processing of strong-motion accelerograms: needs, options and consequences. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 25 (2005) 93–111.

CAETANO, Mario. Propriedade Mecânicas. CTB, 2010-2021. Disponível em: < <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/propriedades-das-borrachas-vulcanizadas/propriedades-fisicas/propriedades-mecanicas>>. Acesso em 13/06/2022.

CEMA: Transportadores de Correia para Materiais a Granel. 7. ed, 2014. 898 p. ISBN 978-85-07-05181-7.

CEMA STANDER 550: CLASSIFICATION AND DEFINITIONS OF BULK MATERIALS, 2014. 77 p. ISBN 1-891171-47-2.

GOODYEAR, s/d. Installation, Maintenance e Troubleshooting Guide, 1-46.

MASOTTI, Diego. Comparação de métodos de determinação do amortecimento estrutural através de técnicas de ajuste de curvas de funções resposta em frequência. 2023. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

ROCHA, Fábio Saraiva.; MARRANGHELLO, Guilherme Frederico. Propriedades de um acelerômetro eletrônico e possibilidades de uso no ensino de mecânica. Título da Revista, ar. Disponível em: [http://www.lajpe.org/march13/6\\_LAJPE\\_739\\_Fabio\\_Saraiva\\_preprint\\_corr\\_f.pdf](http://www.lajpe.org/march13/6_LAJPE_739_Fabio_Saraiva_preprint_corr_f.pdf). Acesso em: 17 maio 2023. UNIVERSIDADE FEDERAL DE DO RIO GRANDE DO SUL. CREF, 2023. Site de perguntas dobre forma de impacto respondidas pelos professores da Universidade. Disponível em: <https://cref.if.ufrgs.br/?cat=55>. Acesso em: 03, 09 e 2022.

RULMECA. (2023). Technical Information project and design criteria for belt convey [PDF]. Recuperado de [https://www.rulmecca.com/contenuti/download/cataloghi\\_completi/en/bulk/Catalog\\_Bulk\\_Handling\\_EN](https://www.rulmecca.com/contenuti/download/cataloghi_completi/en/bulk/Catalog_Bulk_Handling_EN).

RILFTEK. Riftek Sensor e Instruments, 2023. Site do fornecedor do sensor a laser. Disponível em: [https://riftek.com/products/laser\\_triangulation\\_sensor/](https://riftek.com/products/laser_triangulation_sensor/). Acesso em: 10, jun. 2023.

SILVA, Siranny. Projeto de uma máquina de queda livre de peso. Orientador: Marcelo Sampaio Martins. 2017. 70f. TCC (Graduação) – Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Estadual Paulista, Guaratinguetá. 2017. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/157010/000906442.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 11 mar. 2023.

SOUZA, Angelo. Estudo Experimental do Comportamento Viscoelástico Não Linear de Buchas de Borracha Sob Solicitações Estáticas e Dinâmicas. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Itajubá. 2013.

TAVARES, Luís. e LIMA, Alfredo. (2006). Célula de carga de impacto na caracterização de materiais para a cominuição. Parte 1: Calibração. Revista Escola de Minas, Volume (59), 61-69. <https://www.scielo.br/j/rem/a/zbFL7kTTc8y3hXnNFr5f5HH/abstract/?lang=p>.

USINAINFO. Usinainfo Eletrônica e Robótica, 2023.Site do fornecedor do conversor serial para USB. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/conversores-de-sinal/conversor-usb-para-rs485-ch340-com-saida-5v-zk-u485-8333.html>. Acesso em: 11, jun. 2023.