

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PROJETO CONCEITUAL DE MÉTODO DE ENSAIO DE DESGASTE PARA  
CORRENTES DE TRANSMISSÃO DE ROLOS

por

Celso Antonio Pizolotto Junior

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, maio de 2021

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

### CIP - Catalogação na Publicação

Junior, Celso Antonio Pizolotto  
Projeto conceitual de método de ensaio de desgaste  
para correntes de transmissão de rolos / Celso Antonio  
Pizolotto Junior. -- 2021.  
22 f.  
Orientador: Ney Francisco Ferreira.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Correntes de transmissão de rolos. 2. Métodos de  
ensaio de desgaste. 3. Tribologia. 4. Lubrificação. I.  
Ferreira, Ney Francisco, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os  
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Celso Antonio Pizolotto Junior

PROJETO CONCEITUAL DE MÉTODO DE ENSAIO DE DESGASTE PARA  
CORRENTES DE TRANSMISSÃO DE ROLOS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mario Roland Sobczyk Sobrinho  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Escolher uma das áreas de concentração: Processos Fabricação

Orientador: Ney Francisco Ferreira

Comissão de Avaliação:

Prof. Heraldo José de Amorim

Prof. Patric Daniel Neis

Prof. Ney Francisco Ferreira

Porto Alegre, maio de 2021

## DEDICATÓRIA

Dedico aos meus colegas e amigos que conheci durante o período na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pois toda nossa parceria ajudou, e muito, a passar por todas as dificuldades durante a trajetória e me concederam vários momentos felizes. Aos professores por todo compartilhamento de conhecimento e dedicação, grande gratidão. Ainda, dedico este trabalho à minha família. Mesmo em tempos difíceis e, infelizmente, de toda a distância física, me mostrou que com amor e dedicação é possível vencer qualquer dificuldade. Acima de tudo, dedico este trabalho à minha mãe Cleia, meu pai Celso e meu irmão Carlos, que sempre me motivaram e incentivaram ao estudo, me mostrando quais os melhores caminhos a serem seguidos e, sempre, pelo exemplo.

**PROJETO CONCEITUAL DE MÉTODO DE ENSAIO DE DESGASTE  
PARA CORRENTES DE TRANSMISSÃO DE ROLOS**

**Junior, Celso Antonio Pizolotto**  
celsopizolottojr@gmail.com

**Resumo.** As correntes de transmissão de rolos são utilizadas em várias máquinas, devido à confiabilidade e eficiência para transmitir potência mecânica. Geralmente são componentes críticos de segurança, o que exige durante o desenvolvimento de novos projetos de correntes, verificar o desempenho com relação ao desgaste. O presente trabalho tem o objetivo de analisar os métodos existentes para ensaios de desgaste de correntes de transmissão de rolos e propor, através de um projeto conceitual, um equipamento de ensaio que consiga suprir os empecilhos apresentados nos trabalhos disponíveis na literatura. Para isso, foram apresentados quatro métodos de ensaio de desgaste: método de ensaio tradicional, método de ensaio que utiliza dois elos de corrente, método que utiliza cinco elos de corrente e método de ensaio entre pino e bucha. Com base nas análises de vantagens e desvantagens de cada método, concluiu-se que o método de ensaio de desgaste entre pino e bucha é o que apresenta melhores benefícios e resultados. A partir disso, foram propostas melhorias para o futuro desenvolvimento de uma nova máquina de ensaio de desgaste entre pino e bucha.

**Palavras-chave:** corrente de transmissão de rolos, métodos de ensaio de desgaste, vantagens e desvantagens

**Conceptual design of wearing test method for roller chains**

**Abstract.** Roller transmission chains are used on several machines, due to the reliability and efficiency to transmit mechanical power. The roller chains are usually safety critical components, which requires, during the development of new chain designs, to verify performance against wear. The presente work aims to analyzing the existing methods for tests of wear of roller chain transmission and proposing, through a conceptual project, a test equipment that can overcome the difficulties presented in the works available in the literature. For this, four methods of wear test were presented: traditional test method, test method that uses two chains links, test method that uses five chain links and test method between pin and bush. Based on the analysis of advantages and disadvantages of each method, it was concluded that the wear test method between pin e bush is the one that presentes the best benefits and results. Based on that, improvements were proposed for the future development of a new wear test machine between pin and bush.

**Keywords:** roller chains, wear test methods, advantages and disadvantages

## NOMENCLATURA

<b>Símbolos</b>	<b>Unidade</b>	<b>Descrição</b>
WT	%	Desgaste total entre pino e bucha
WP	%	Desgaste do pino
WB	%	Desgaste da bucha
$\Delta\theta$	°(Graus)	Ângulo de fricção entre pino e bucha
N	–	Número de dentes da roda dentada
$\omega$	Rad/s	Velocidade angular média
T	1/s	Período
t	s	Tempo
R	m	Raio
V	m/s	Velocidade média

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO.....	2
2.1 Correntes de transmissão de rolos.....	2
2.2 Funcionamento da corrente de transmissão de rolos.....	3
2.3 Falha esperada em corrente de transmissão.....	3
2.4 Como retardar a falha em correntes de de transmissão.....	4
2.5 Metodologias para ensaio de correntes frente à falha esperada.....	5
2.5.1 Método tradicional de ensaio de desgaste para correntes de transmissão.....	5
2.5.2 Método de ensaio de desgaste utilizando dois elos da corrente.....	6
2.5.3 Método de ensaio de desgaste utilizando cinco elos da corrente.....	7
2.5.4 Método de ensaio de desgaste entre pino e bucha.....	8
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	8
3.1 Ângulo de deslizamento entre pino e bucha.....	9
3.2 Velocidade angular de deslizamento entre pino e bucha.....	9
3.3 Velocidade de deslizamento entre oino e bucha.....	10
3.4 Desgaste entre pino e bucha.....	10
4. RESULTADOS.....	11
4.1 Análise de vantagens e desvantagens dos métodos propostos.....	11
4.2 Melhorias propostas para o ensaio entre pino e bucha.....	11
5. CONCLUSÕES.....	13
6. REFERÊNCIAS.....	14

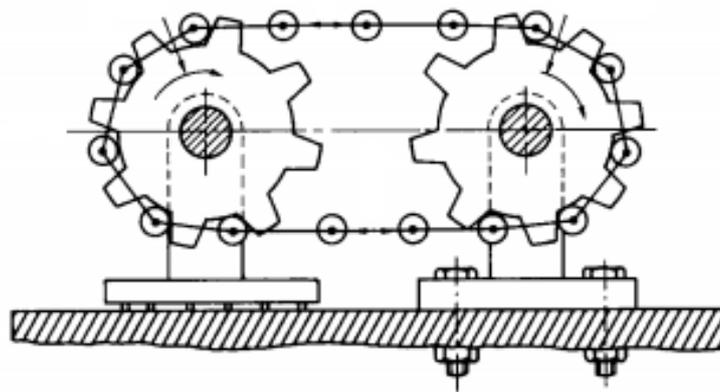
## 1. INTRODUÇÃO

As correntes de transmissão de rolos são amplamente utilizadas devido a sua versatilidade, confiabilidade e eficiência para transmitir potência mecânica em vários tipos de máquinas e equipamentos, desde grandes maquinários da indústria ou até mesmo carros e bicicletas (Peeken et al., 1986). Um dos grandes desafios dos fabricantes de correntes de transmissão de rolos é melhorar a resistência ao desgaste das mesmas.

A vida útil de uma corrente de rolos é normalmente definida pelo seu alongamento (Burgess et al., 2012). Quando o tamanho de passo, distância entre o centro de um pino e outro mais próximo, é aumentado, ocorre o alongamento, que se for superior a 2% ou 3% do comprimento original da corrente, poderá causar dificuldades de engrenamento com a roda dentada (Hollingworth, 1987).

Hollingworth (1987) apresenta o método que tradicionalmente é utilizado para ensaio de correntes de transmissão e cujo esboço é apresentado na Figura 1:

Figura 1 - Método tradicional de ensaio de desgaste de correntes de transmissão (Hollingworth, 1987).



Neste método, uma corrente de transmissão, em seu tamanho original, é montada em um sistema de transmissão constituído por duas rodas dentadas e colocada em funcionamento durante um elevado número de ciclos. O objetivo do ensaio é provocar na corrente um desgaste possível de ser medido através do alongamento. Este método, porém, se torna caro e oneroso, por conta da vida útil da corrente ser relativamente longa (Burgess et al., 2012). Além disso, há um grande custo energético para a realização do ensaio.

Com o propósito de suprir as dificuldades acima mencionadas, novos métodos têm sido desenvolvidos, onde somente parte das correntes são ensaiadas. Noguchi et al. (2009) desenvolveram uma máquina que ensaia dois elos da corrente, simulando o desgaste principal das correntes de transmissão de rolos. Em 2012, Burgess e colaboradores desenvolveram um equipamento que ensaia 5 elos de uma corrente, que tensiona a mesma entre duas hastes, deixando-a dessa forma numa posição linear. Recentemente, Saito et al. (2020) desenvolveram uma máquina que realiza o ensaio com pinos e buchas.

Nesse contexto, o presente trabalho tem o objetivo de analisar os métodos já existentes para ensaios de correntes de transmissão de rolos e propor, através de um projeto conceitual, um equipamento de ensaio que consiga suprir as dificuldades apresentadas nos trabalhos disponíveis na literatura.

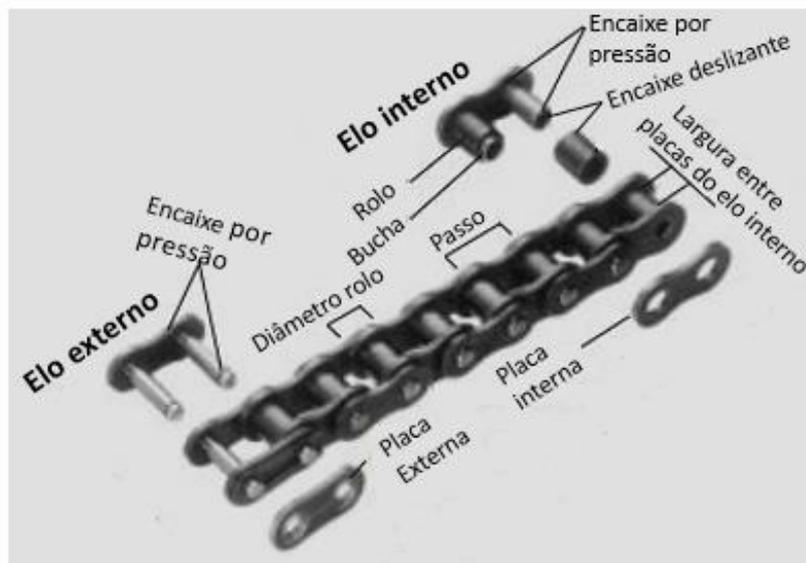
## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Correntes de transmissão de rolos

No final do século XIX, surgiu uma grande demanda por correntes de transmissão de rolos. Esse tipo de corrente era utilizado em bicicletas, máquinas industriais e até mesmo nos primeiros automóveis, com intuito de possibilitar a sincronização de movimentos e transmissão de potência com alta eficiência. Em virtude dessa grande demanda, novos métodos de organização de fabricação foram introduzidos, os quais deram origem à indústria moderna de correntes de transmissão, pois foram desenvolvidas máquinas de montagem automatizadas e de alta velocidade (American Chain Association, 2006).

As correntes de rolos (Figura 2) são fabricadas em vários tipos, cada uma projetada para um uso específico, porém todas elas são construídas de forma que os pinos fiquem uniformemente espaçados, isto é, tenham o mesmo tamanho de passo. As dimensões nominais de fabricação de correntes de rolos seguem os padrões da norma ASME B29.1, que objetiva fazer com que correntes e rodas dentadas sejam intercambiáveis, permitindo que a corrente de um fabricante substitua a corrente de outro (Conwell et al., 1996). A corrente de rolos é identificada por três dimensões principais, ou seja, o passo, a largura interna e o diâmetro do rolo. Essas dimensões determinam o ajuste entre a corrente e as rodas dentadas (Peeken et al., 1986).

Figura 2 - A constituição de uma corrente de rolos (adaptado de Tsubaki, 1997).



A bucha é um cilindro oco que é ajustado sob pressão nos orifícios da placa interna (Figura 2). Já o pino é fixado à placa externa, também sob pressão, para que não gire (Figura 2). Ao mesmo tempo, forma uma peça de suporte de carga, juntamente com a bucha, quando a corrente flexiona durante o engate na roda dentada (King e Song, 2019).

As placas, internas e externas, são os componentes que suportam a tensão, que é imposta repetidas vezes na corrente durante o ciclo, às vezes acompanhada até mesmo por choques (Conwell et al., 1996). Além disso, deve atender aos requisitos de resistência a fatores ambientais, como a corrosão (Fuglede et al., 2016).

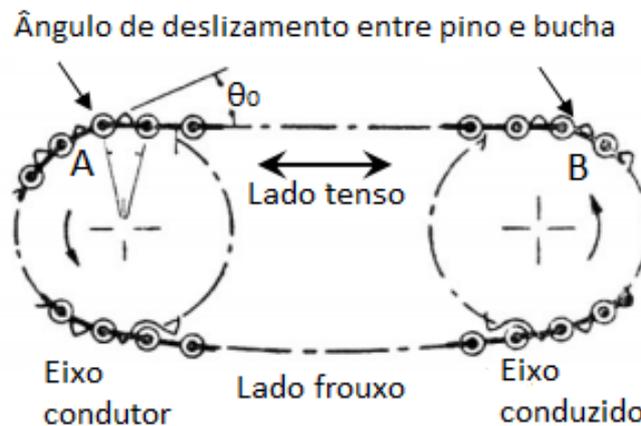
Os rolos têm comprimento e diâmetro projetados para que fiquem com folga para permitir girar livremente por fora da bucha e entre as placas internas, minimizando assim o atrito e o desgaste durante o contato com os dentes da roda dentada (Thongjitr et al., 2017).

## 2.2 Funcionamento da corrente de transmissão de rolos

As correntes de rolos são utilizadas em uma ampla variedade de aplicações, sendo a maioria usada em acionamentos. As rotações podem variar de 50 a 10.000 rpm, e a potência transmitida varia de uma fração de HP (Horse power) a mais de 1000 HP (American Chain Association 2006).

O funcionamento da corrente de transmissão de rolos geralmente ocorre como observado na Figura 3. A roda dentada da esquerda, ligada ao eixo condutor, ao girar promove o movimento do sistema, tracionando o lado superior da corrente. Já a roda dentada da direita, ligada ao eixo conduzido, é para onde a potência é transmitida. Como no lado inferior da corrente não há tração, ele fica frouxo.

Figura 3 - Exemplificação do funcionamento de uma corrente de rolos (adaptado de Noguchi et al., 2009)



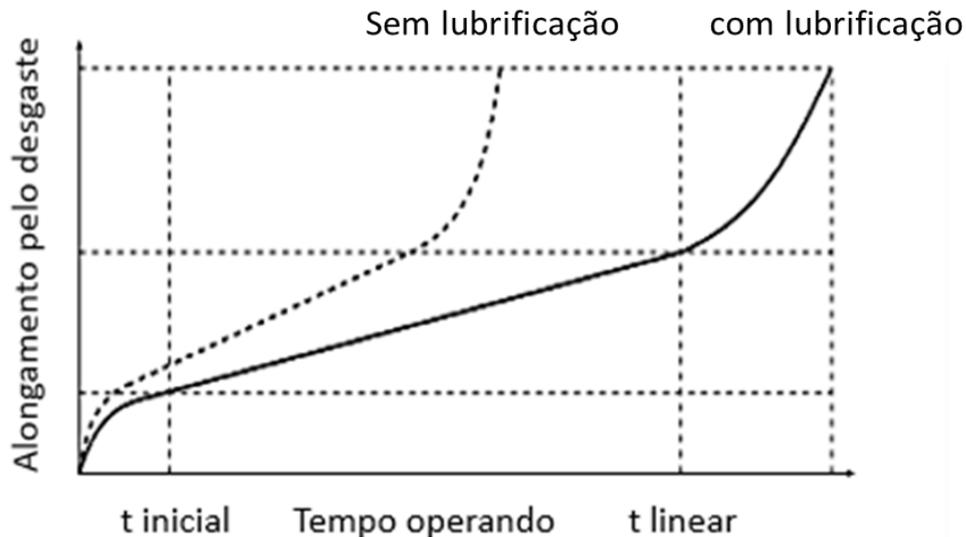
Ao concentrar a atenção em um pino e uma bucha, observa-se que ocorre um movimento de curvatura na corrente causado pelo carregamento de tensão nos pontos de dobra A e B do lado superior do mecanismo, exemplificados na Figura 3. Essa curvatura é o ângulo de inclinação da roda dentada,  $\theta_0$ , o qual determina o contato de movimento relativo entre o pino e a bucha (Peeken et al., 1986), que é o maior promotor do desgaste, e ocorre na entrada e na saída das rodas dentadas. Portanto, de acordo com Saito et al. (2020), o desgaste da corrente de rolos ocorre quando o ângulo de curvatura é alterado sob tensão de carregamento. Na roda condutora o pino é fixado sob o estado compressivo e a bucha gira. Na roda conduzida, ocorre o contrário, a bucha é fixada sob compressão e o pino gira. O período do movimento da curvatura depende da velocidade de rotação do eixo de transmissão, da distância entre os eixos e do diâmetro (quantidade de dentes) da roda dentada (Kärcher e Schullerus, 2017).

## 2.3 Falha esperada em correntes de transmissão

Moxon, no ano de 1979, sugeriu que as falhas ocorridas em correntes podem ser agrupadas em duas classes: aquelas causadas por forças atuantes diretamente na corrente e as causadas pela ação da fricção, ou seja, desgaste. Contudo, desde que os fatores de segurança corretos sejam aplicados durante o procedimento de seleção da corrente, a quebra devido a forças é bastante improvável, e a vida útil da corrente é então limitada apenas pelo seu desgaste (Hollingworth, 1987). Segundo Kärcher e Schullerus (2017), o desgaste é definido como sendo as modificações nas juntas devido ao contato tribológico entre pinos e buchas enquanto a corrente está em utilização.

Na Figura 4 observa-se o processo de desgaste quantitativo durante o funcionamento de uma corrente de rolos:

Figura 4 - Processo de desgaste das correntes de transmissão (adaptado de Kärcher e Schullerus, 2017).



Ao analisar a Figura 4 é possível observar que nas primeiras horas de funcionamento da corrente, do instante 0 a  $t$  inicial, chamado de desgaste inicial, o alongamento produzido pelo desgaste cresce fortemente devido a ajustes nas juntas da corrente. Já durante o intervalo de desgaste  $t$  inicial e  $t$  linear, o desgaste aumenta lentamente e quase de maneira linear. Este estágio é seguido por um período de desgaste progressivo, o qual exige a substituição da corrente o mais breve possível. Dessa forma, a vida útil é, normalmente, determinada pelo aumento do comprimento original da corrente de transmissão (Burgess et al., 2012).

A linha tracejada na Figura 4 representa uma curva típica de uma corrente lubrificada pelo fabricante e sem qualquer relubrificação durante todo o tempo de operação. Em contraste, a linha sólida ilustra o desgaste da corrente quando é frequentemente lubrificada, resultando em uma maior vida útil (Kärcher e Schullerus, 2017).

#### 2.4 Como retardar a falha em correntes de transmissão

Pela observação da Figura 4, ficou evidenciado que a lubrificação de correntes é algo necessário. Radcliff (1981) foi o primeiro a descrever os mecanismos de desgaste em uma corrente não lubrificada. De acordo com o autor, apenas aplicações específicas permitem a ausência de lubrificação, por liberdade de manutenção, redução de riscos de contaminação de produtos por lubrificantes, ou até mesmo a eliminação da necessidade de uma lubrificação que eleve o custo total do Sistema de transmissão (Hollingworth, 1987).

A lubrificação influencia reduzindo significativamente a velocidade de desgaste e a taxa de alongamento, portanto, interfere diretamente na vida útil da corrente. Se um tipo inadequado de lubrificação é aplicado, ou se o lubrificante não corresponder às especificações de viscosidade do óleo ou de uso de aditivos, o desgaste (alongamento) será extremamente acelerado ao longo do tempo. Experimentos conduzidos por (Sappok et al., 2014) demonstraram que 60% de todas as falhas de correntes de transmissão poderiam estar relacionadas a métodos de lubrificação incorretos e lubrificantes inadequados.

Normalmente, diferentes métodos de lubrificação podem ser encontrados, no entanto, os tipos recomendados dependem do passo e da velocidade da corrente e da temperatura do ambiente, a qual pode interferir na viscosidade do óleo (Peeken et al., 1986).

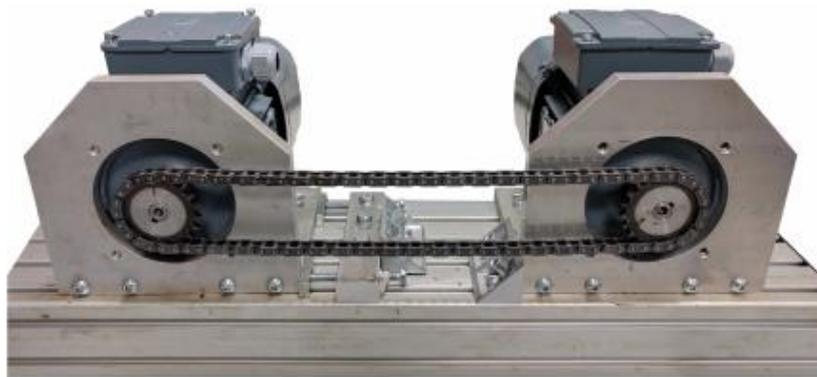
## 2.5 Metodologias para ensaios de correntes frente à falha esperada

Como as correntes de rolos transmitem potência, geralmente, são componentes críticos de segurança e, por isso, é importante verificar o desempenho de novos projetos de correntes por meio de ensaios. Portanto, fabricantes e pesquisadores fazem muitos esforços para melhorar a resistência ao desgaste.

### 2.5.1 Método tradicional de ensaio de desgaste para correntes de transmissão

As plataformas tradicionais de teste de desgaste geralmente consistem em uma corrente de transmissão e duas rodas dentadas em um sistema de acionamento rotativo, conforme a Figura 5.

Figura 5 - Método tradicional de ensaio de desgaste (adaptado de Kärcher e Schullerus, 2017).



Nesta máquina, os dois motores elétricos e o conjunto de rodas dentadas são montados em paralelo (Figura 5). Um desses motores é utilizado para gerar torque de acionamento para o sistema, enquanto o outro motor é utilizado para fornecer torque resistivo e absorver energia, funcionando como um freio (Wang e Meng, 2005). Esse equipamento é constituído por vários outros componentes, além dos motores, incluindo rodas dentadas, acoplamentos, caixas de engrenagens e a corrente em seu tamanho original (Saito et al., 2020). Portanto, pela utilização desses componentes, que também são utilizados em máquinas de transmissão de potência, os resultados podem ser considerados os reais de uso (Kärcher e Schullerus, 2017).

Normalmente, o teste é executado com correntes de rolos compostas por 80 a 100 elos (Noguchi et al., 2009), que giram em torno das rodas dentadas carregadas por uma tensão, na maioria das vezes, por mais de 300 horas e sem nenhum tipo de lubrificação (Burgess et al., 2012). A carga de tensão e velocidade de rotação são pré-determinadas em função do tamanho da corrente.

Como resultado, o alongamento, provocado pelo contato relativo entre pino e bucha, é medido, comparando-se os comprimentos totais antes e depois da realização do teste. É esperado que o desgaste observado após o ensaio seja semelhante ao representado na Figura 6.

Figura 6 - Pino e bucha após o ensaio de desgaste na máquina tradicional (adaptado de Saito et al.,2020)



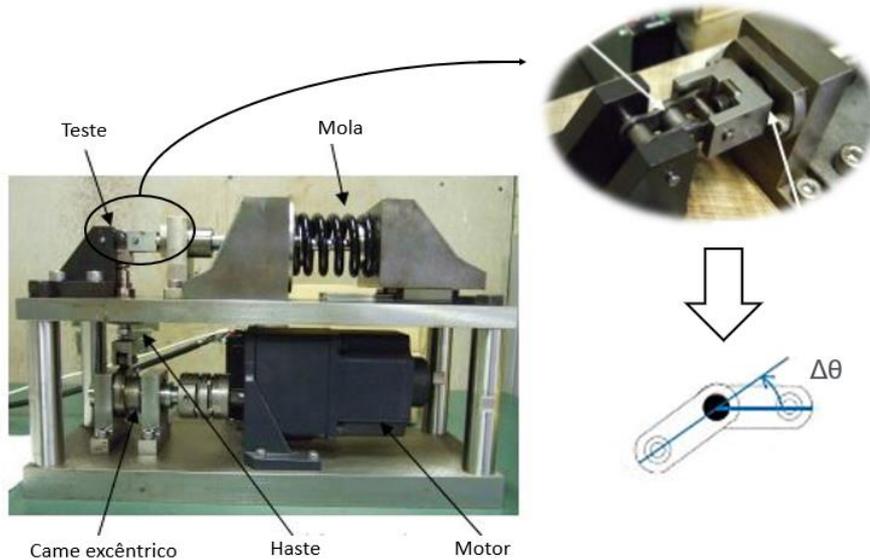
Porém, as máquinas de teste tradicionais para correntes de rolos tem uma série de desvantagens. Primeiramente, devido à grande quantidade de componentes, requerem grande espaço para acomodação. Há a dificuldade de acelerar o teste, porque velocidades muito elevadas podem promover vibrações na corrente trazendo resultados errôneos para o ensaio. Adicionalmente, pela vida útil da corrente ser bastante elevada, há o desgaste de vários outros componentes da plataforma ao passo que a corrente se desgasta. Por fim, há a necessidade da corrente ser retirada da máquina durante o teste para a medição do comprimento, o que aumenta o tempo de ensaio e pode introduzir ao teste uma fonte significativa de erro, o desalinhamento. (Burgess et al. 2012)

### 2.5.2 Método de ensaio de desgaste utilizando dois elos da corrente

Considerando que o maior desgaste em correntes de rolo ocorre entre o pino e a bucha, e o movimento que o promove acontece apenas duas vezes em cada ciclo completo, Noguchi et al. (2009) construíram na Universidade de ciência de Tóquio no Japão um novo método que não utiliza a corrente em seu tamanho original. Neste equipamento são utilizados apenas dois elos da corrente, pois eles podem sofrer o movimento de curvatura (movimento oscilante) do funcionamento tradicional, o qual promove o desgaste continuamente. De acordo com os autores o mecanismo de funcionamento se dá pelo tensionamento do corpo de prova, o qual ocorre por meio da deflexão de uma mola que fica posicionada na parte superior da estrutura (Figura 7). A junta dos elos do corpo de prova é empurrada por uma haste, que faz a conexão do primeiro andar da estrutura com o segundo. Essa haste é impulsionada por um came excêntrico que é girado por um motor (Figura 7), fazendo com que a haste se mova para cima e para baixo e promova o deslizamento entre o pino e a bucha. A tensão aplicada aos elos da corrente depende da deflexão da mola, à medida que, o ângulo de curvatura entre pino e bucha depende da excentricidade do came. A velocidade do movimento de curvatura depende da velocidade de rotação do motor.

Adicionalmente, foi mencionado por Noguchi et al. (2009), que esse novo método não obteve o efeito esperado, pois resulta em um desgaste não uniforme, sendo diferente do apresentado na Figura 6.

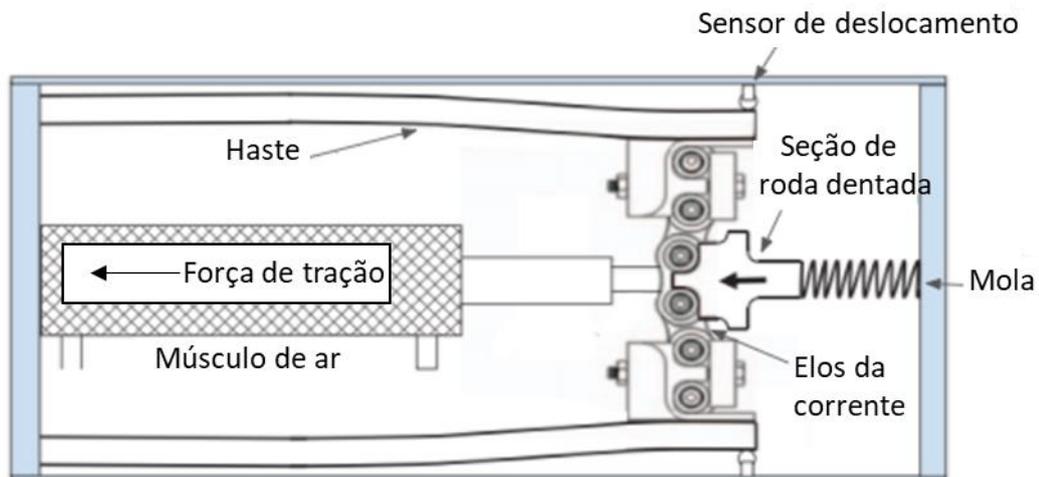
Figura 7 - Equipamento de ensaio de dois elos da corrente (adaptado de Noguchi et al., 2009).



### 2.5.3 Método de ensaio de desgaste utilizando cinco elos da corrente:

Em 2012, na Inglaterra, foi desenvolvida no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Bristol, em parceria com a empresa Renold PLC, o equipamento que ensaia cinco elos de uma corrente por (Burgess et al., 2012). O sistema funciona sobre uma bancada, cinco elos da corrente são presos e tensionados entre duas hastes, as quais, são fixadas na estrutura do equipamento e ficam na posicionadas direção horizontal (Figura 8), dessa forma, deixando os pinos e as buchas da corrente na vertical. O elo central do segmento de corrente de cinco elos é articulado por uma seção de roda dentada, de apenas um dente, que tem conectada em um de seus lados um atuador linear, chamado de “músculo de ar”. Na outra extremidade, o segmento da corrente é preso em uma mola (Figura 8), a qual é utilizada para retrair a seção da roda dentada quando o “músculo de ar” está relaxado.

Figura 8 - Equipamento de ensaio de cinco elos da corrente (adaptado de Burgess et al., 2012)



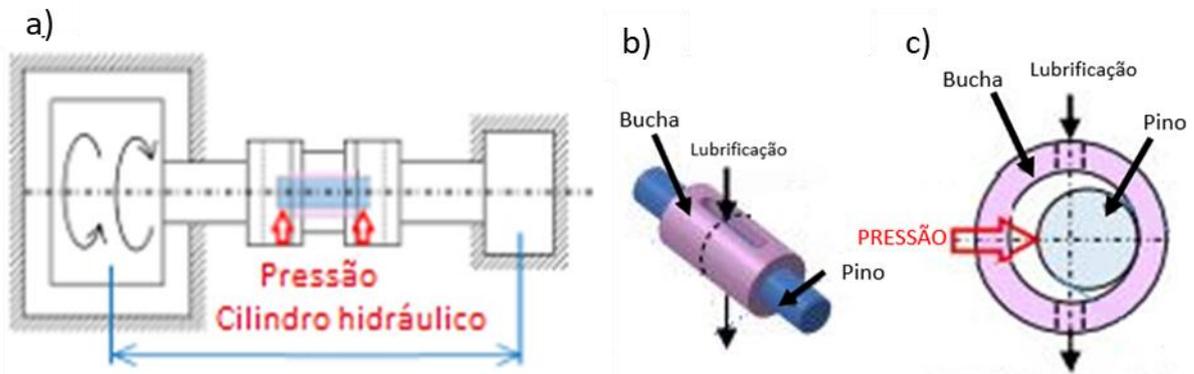
O “músculo de ar” é um atuador linear de alta tensão que, quando contraído, aplica uma pressão no corpo de prova, através da seção de roda dentada, formando um ângulo nos cinco elos da corrente (Figura 8). Dessa forma, simula os pontos críticos da aplicação tradicional da

corrente de rolos, quando a corrente entra na roda dentada condutora ou quando sai da roda dentada conduzida durante o funcionamento. O sistema opera controlando a pressão e a demanda de frequência no atuador linear, resultando em ações recíprocas de contração e extensão do mesmo. Os sensores de deslocamento, posicionados entre a estrutura da máquina e as hastes (Figura 8) medem não apenas o deslocamento das hastes durante a articulação da corrente, mas também o aumento do comprimento absoluto da corrente ao longo do teste (Burgess et al., 2012). Segundo os desenvolvedores, o método obteve resultados satisfatórios, pois o desgaste na corrente ocorre conforme exemplificado na Figura 4. Sendo, o desgaste inicial acelerado, seguido do desgaste lento, quase linear, e ao final do ensaio a corrente apresentando um desgaste progressivo, novamente, bastante acelerado.

#### 2.5.4 Método de ensaio de desgaste entre pino e bucha

Pesquisadores japoneses do Instituto de Tecnologia de Kyoshu, em parceria com a empresa Senqia Corporation Kanto Works, desenvolveram uma máquina que utiliza apenas um pino e uma bucha no ensaio de desgaste, com o objetivo de melhorar a repetibilidade, reduzir o custo de manutenção das peças de teste e minimizar o tempo de preparação da máquina em relação ao ensaio tradicional (Saito et al., 2020). De acordo com os autores, para obter a repetibilidade esperada na máquina de teste de desgaste, o pino é pressionado hidráulicamente contra a bucha (Figura 9a) e, durante a operação, a máquina aplica movimentos deslizantes recíprocos entre pino e bucha, os quais promovem esse deslizamento na mesma direção e ângulo que no funcionamento da corrente real.

Figura 9 - a) Esquema da máquina de ensaio de pino e bucha, b) Forma de lubrificação e c) Vista lateral montagem pino e bucha (adaptado de Saito et al., 2020).



O pino e a bucha utilizados no teste são fabricados por conformação mecânica e por torneamento, inclusive, é possível observar na Figura 9b que a bucha é vazada na lateral para a introdução do lubrificante e auxiliar na limpeza dos detritos promovidos pelo desgaste. A bucha da peça de teste é encaixada sob pressão em um suporte na máquina e o pino é inserido no interior da bucha. O eixo do motor é conectado diretamente com o suporte para que a bucha execute o movimento de deslizamento recíproco em relação ao pino. A pressão é aplicada por um cilindro em ambas as extremidades do pino, que se projetam para fora da superfície da bucha para que o mesmo fique fixo enquanto a bucha se movimenta promovendo o desgaste (Saito et al., 2020). De acordo os desenvolvedores do método, os resultados foram satisfatórios e demonstraram grande semelhança com os resultados do método tradicional.

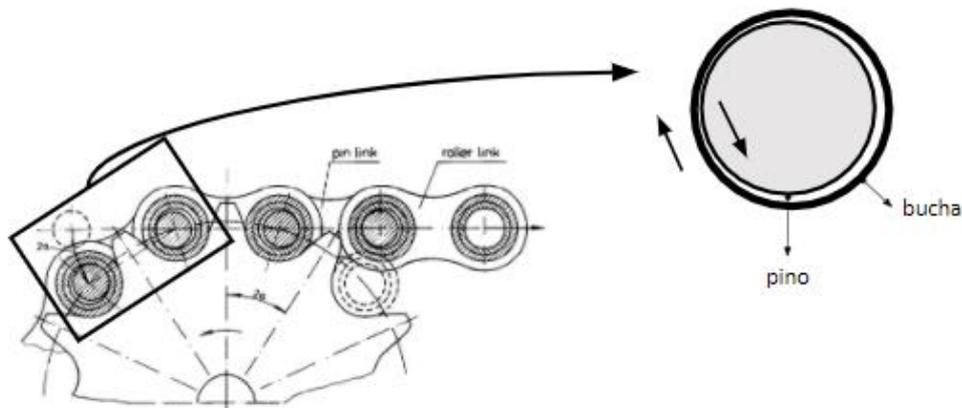
### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Para desenvolver um método teórico de ensaio de desgaste é necessário o entendimento de alguns conceitos práticos de funcionamento de uma corrente de transmissão de potência. Como referência para a realização dos cálculos será utilizada uma corrente ISO08, cujo tamanho do passo (P) é 12,7 mm e o diâmetro de pino (D) é de 4,45 mm. Essas dimensões foram retiradas do Manual de correntes da Tsubaki (2012).

#### 3.1 Ângulo de deslizamento entre pino e bucha

A imagem abaixo representa o local onde ocorre o deslizamento recíproco entre pino e bucha (Figura 10).

Figura 10- Ângulo de deslizamento entre pino e bucha (adaptado de Peeken et al., 1986).



A Equação 1 descreve o ângulo de giro da bucha sobre o pino no momento em que ocorre o engrenamento da corrente na roda dentada.

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{N} \quad (1)$$

Theta ( $\theta$ ) corresponde ao ângulo de deslizamento recíproco entre o pino e a bucha e o valor N o número de dentes da roda dentada ensaiada. Portanto, quanto menor o número de dentes, maior será o ângulo Theta ( $\theta$ ). Dessa forma, para uma roda dentada de 17 dentes, substituindo o valor na Equação 1, encontra-se o ângulo de giro resultante de aproximadamente 21,2°.

#### 3.2 Velocidade angular de deslizamento entre pino e bucha

Para realizar o cálculo da velocidade angular de deslizamento entre o pino e a bucha, deve-se calcular, primeiramente, o tempo desse deslizamento pela Equação 2.

$$t = \frac{T}{N} \quad (2)$$

Onde T representa o período de tempo para a roda completar uma volta completa e N significa a quantidade de dentes da roda dentada. Supondo que a roda dentada de 17 dentes opere a uma velocidade máxima de 750 rpm (12,5 rps), substitui-se os valores na Equação 2 e o tempo encontrado é de 0,0047 s.

O giro relativo entre pino e bucha ( $\Delta\theta$ ) deve ocorrer nesse intervalo de tempo (t) calculado. Logo, a velocidade angular média ( $\omega$ ) é encontrada pela Equação 3.

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{t} \quad (3)$$

Portanto, substituindo os valores calculados, anteriormente, de  $\Delta\theta$  e de t, na Equação 3, encontra-se a velocidade angular de 78,7 rad/s.

### 3.3 Velocidade de deslizamento entre pino e bucha

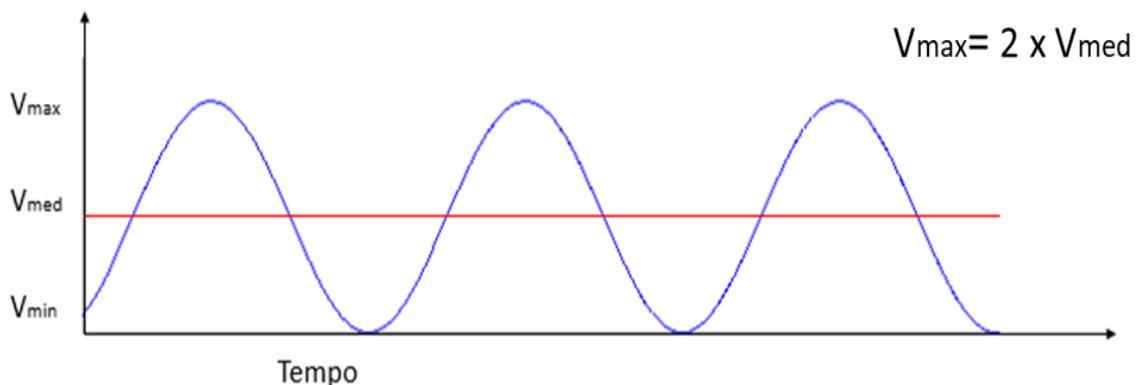
A velocidade média é calculada pela Equação 4, através da multiplicação da velocidade angular ( $\omega$ ) pelo raio do pino (R).

$$V_{med} = \omega \times R \quad (4)$$

Se o diâmetro (D) da corrente ISO08 é de 4,45 mm, então o raio é de 2,225 mm. Ao multiplicar esse valor de R pelo valor de  $\omega$  calculado anteriormente, encontra-se que a velocidade média é de 0,175 m/s.

Sabendo que o movimento relativo parte da velocidade de 0 m/s. Assume-se que o perfil da velocidade seja senoidal e a velocidade máxima ( $V_{max}$ ) é encontrada pela multiplicação da velocidade média por 2. Para que tenha o perfil senoidal da Figura 11.

Figura 11 – Função senoidal da velocidade



### 3.4 Desgaste entre pino e bucha

Para encontrar o desgaste total, utiliza-se a equação 5:

$$WT = WP + WB \quad (5)$$

Onde WT representa o desgaste total, WP o desgaste do pino e WB o desgaste da bucha. Para a realização desse cálculo, faz-se o processo inverso. Como já mencionado anteriormente, o desgaste máximo para a corrente é de 3% do seu comprimento original. Ao considerar uma corrente ISO08 de 80 passos, cujo tamanho de passo é igual a 12,7 mm, a mesma poderá ter um alongamento máximo de 30 mm. Logo, dividindo este valor pelo número de elos da corrente encontra-se um valor igual a 0,375 mm, este número representa o desgaste total (WT) de diâmetro em cada elo, sendo que, uma parte desse valor se referente ao pino (WP) e a outra parte à bucha (WB).

## **4. RESULTADOS**

### **4.1 Análises de vantagens e desvantagens dos métodos propostos**

Através da análise do funcionamento dos quatro métodos de ensaio de desgaste para correntes de transmissão de rolos avaliados, e com base nas observações feitas pelos desenvolvedores dessas máquinas, a seguir são descritas vantagens e desvantagens desses equipamentos e apontadas algumas possíveis melhorias nos métodos para o desenvolvimento de novas tecnologias para ensaios de correntes.

Com base no referencial teórico consultado, observa-se que o método de ensaio de dois elos e o método de ensaio de cinco elos surgiram como alternativas aos tradicionais. A vantagem dos métodos alternativos de ensaio desenvolvidos é de não necessitarem da corrente de transmissão inteira, tendo assim, a possibilidade de aumentar a velocidade do ensaio. No método tradicional, a duração do ensaio para desgastar todos os pares de pinos e buchas da corrente, é bastante elevada. No caso dos alternativos, ensaiam-se alguns poucos pares de pinos e buchas e, conseqüentemente, a duração do ensaio reduz. Além disso, resultam em equipamentos mais compactos e com menor custo de manutenção, visto que operam com um menor número de componentes, quando comparados com o método tradicional.

Todos os métodos analisados apresentam as suas particularidades, o método tradicional reproduz o funcionamento de forma similar às condições de uso reais das correntes. O ensaio de dois elos gera a possibilidade da utilização de um corpo de prova bastante pequeno. Já o ensaio de cinco elos trouxe a possibilidade de medir o alongamento da corrente provocado pelo desgaste sem desmontar a máquina, algo que não era possível no ensaio de dois elos, nem no ensaio tradicional. Dessa forma, o ensaio de cinco elos proporcionou anular a possibilidade da corrente (corpo de prova) ser montada desalinhada, o que poderia resultar em erros no resultado do ensaio ou até mesmo no desgaste entre as placas. E o ensaio pino e bucha conseguiu contemplar as duas vantagens citadas acima dos métodos alternativos.

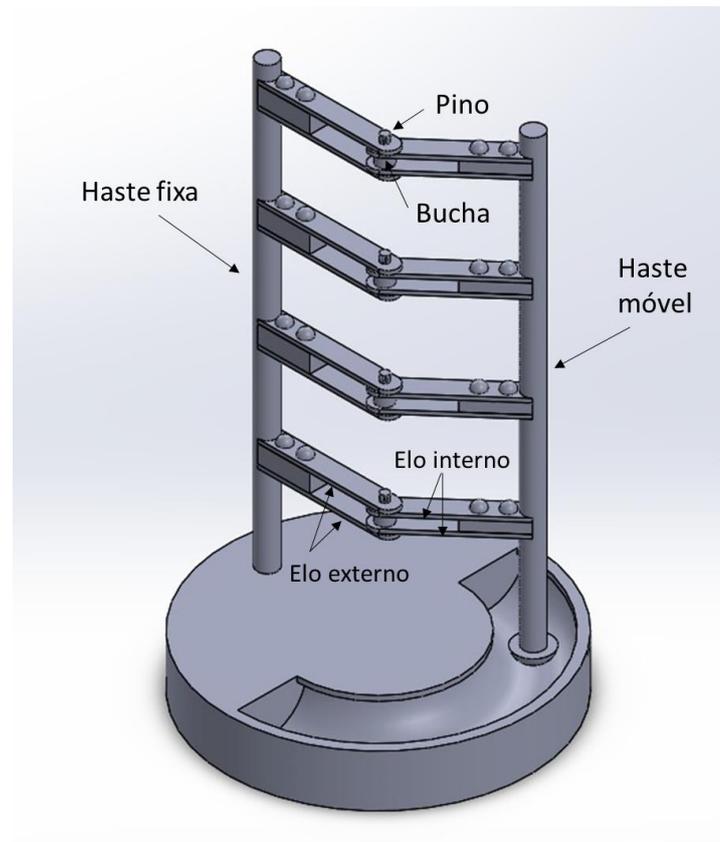
A primeira desvantagem encontrada na análise dos métodos de ensaio de desgaste, exceto o de cinco elos, é que nos demais ensaios avaliados existe uma dificuldade de limpeza das partículas de material que vão se desintegrando tanto do pino quanto da bucha decorrentes do desgaste durante a execução do ensaio. O método tradicional, o método que ensaia dois elos de corrente, e o método que ensaia apenas o pino e a bucha, posicionam o corpo de prova (seção de corrente) na horizontal, o que não possibilita a saída dos fragmentos resultantes do desgaste. Outro ponto de dificuldade encontrado é que todas as máquinas apresentadas ensaiam apenas um corpo de prova durante cada teste realizado.

Considerando-se os prós e contras de cada método de ensaio, observou-se que a melhor configuração de equipamento a ser desenvolvido seria aquela que ensaia apenas pinos e buchas, por ser mais barato, prático e também por apresentar um menor número de possíveis falhas na montagem ou durante a execução do ensaio.

### **4.2 Melhorias propostas para o ensaio entre pino e bucha**

Com base nos referenciais teóricos consultados, propõe-se algumas melhorias no ensaio de pino e bucha. Essas melhorias são baseadas numa proposta de projeto conceitual de um novo método, o qual ensaia vários pinos e buchas, um em cima do outro, todos com a mesma velocidade e força de compressão entre pino e bucha, como pode ser visualizado na Figura 12.

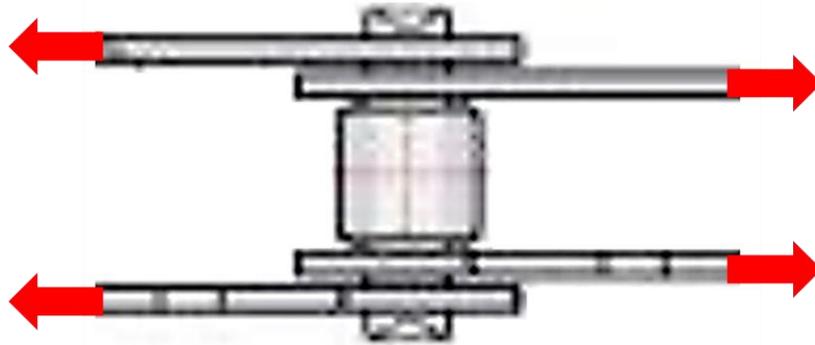
Figura 12 – Ilustração do novo método teórico desenvolvido.



O método mostrado na Figura 12 possibilita a comparação de desgaste entre diferentes corpos de prova (pinos e buchas) trabalhando nas mesmas condições e de uma só vez, diminuindo o consumo energético e o tempo para a obtenção dos resultados. Além disso, esse novo tipo de método de ensaio viabiliza a realização do teste utilizando diferentes tipos de lubrificantes em cada corpo de prova, que podem ser retirados da mesma corrente de transmissão, funcionando assim como um ensaio de comparação entre lubrificantes. Em relação à dificuldade de limpeza dos detritos de desgaste, esse novo projeto conceitual de equipamento é capaz de ensaiar pinos e buchas que ficam posicionados na direção vertical (Figura 12), possibilitando o auxílio da gravidade na limpeza desses detritos e na lubrificação, se for optado por utilizá-la. Ainda, neste novo projeto de equipamento seria indicado a instalação de um jato de ar, que pode servir para a limpeza do corpo de prova e da máquina.

A forma de fixação dos corpos de prova na máquina seria de tal forma a fixá-los e tensioná-los por meio das suas placas (Figura 13) no equipamento, que terá duas hastes (braços), uma delas fixa e a outra móvel. A haste móvel fica em um trilho mais largo que a própria haste, possibilitando a tração do corpo de prova, como é demonstrado na Figura 12. Além disso, todos os conjuntos de pinos e buchas devem executar o ensaio com a mesma força de atrito entre pino e bucha, recomenda-se fazer este tensionamento por meio de uma espécie de “músculo de ar” e uma mola restauradora semelhantes ao método de cinco elos da seção 2.5.3, fixados no braço móvel. Portanto, para minimizar a possibilidade de erro, a nova máquina de ensaio entre pino e bucha funcionará com os componentes da corrente ainda montados no formato original e com as placas cortadas ao meio como pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 – Tensionamento do corpo de prova do novo método teórico.



## 5. CONCLUSÕES

O trabalho apresentado teve o objetivo de propor um projeto conceitual de um equipamento de ensaio de correntes de transmissão de rolos. Com base na análise dos resultados dos quatro diferentes tipos de ensaios de correntes de transmissão de rolos consultados na literatura, método de ensaio tradicional, método de ensaio de dois elos, método de ensaio de cinco elos e método de ensaio pino e bucha, foi possível concluir que o ensaio entre pino e bucha é o mais adequado devido à sua durabilidade e composição mais simples, o qual proporcionou um menor custo de construção e manutenção, além de um menor gasto energético. Salienta-se ainda no projeto teórico desenvolvido, a utilização dos corpos de prova com placas cortadas ao meio de uma corrente original, posicionados na vertical para melhorar a limpeza dos detritos de desgaste e a presença do jato de ar.

Para a construção da máquina de ensaio de desgaste que será desenvolvida através desse projeto conceitual, aconselha-se atenção no desenvolvimento de uma forma de fixação robusta do corpo de prova na máquina.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN CHAIN ASSOCIATION. **Standard Handbook of Chains: Chains for Power Transmission and Material Handling**. Second Edition. CRC Press. 2005.
- KANEHIRA, M.; OTAN, T.; YOSHIKAWA, M.; TAKAHASHI, Toshio. **The Complete Guide to Chain: Tsubaki**. 1. ed. U.S. Tsubaki, Inc., 301 East Marquardt Drive, Wheeling, Illinois 60090: Kogyo Chosakai Publishing Co., Ltd., 1997. 230 p. v. 1.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Precision Power Transmission Roller Chains, Attachments, and Sprockets: ASME B29**. 1-2011; Revision of ASME B29. 1 and Partition from ASME B29. 100-2002
- BURGESS, S. C.; PYPER, T.; LING, C. S. **A linear actuated chain test rig capable of accelerated test speeds and continuous wear measurements**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, v. 227, n. 5, p. 1047-1055, 2013.
- NOGUCHI, S., YOSHIBA, H., NAKAYAMA, S., KANADA, T. **Evaluation of wear between pin and bush in roller chain**. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, v. 3, n. 4, p. 355-365, 2009.
- SAITO, R.; NODA, NA.; SANO, Y. **Newly Developed Wear Testing Machine Having Sufficient Reproducibility Useful for Investigating Roller Chains**. ISIJ International, v. 60, n. 10, p. 2255-2265, 2020.
- FUGLEDE, N.; THOMSEN, J. J. Kinematics of roller chain drives—Exact and approximate analysis. **Mechanism and Machine Theory**, v. 100, p. 17-32, 2016.
- THONGJITR, P.; NINPETCH, P.; KOWITWARANGKUL, P. **Wear resistance improvement of the roller chain parts at Thai Metro Industry (1973) Co., Ltd**. Materials Today: Proceedings, v. 5, n. 3, p. 9431-9439, 2018.
- PEEKEN, H.; COENEN, W. **Influence of oil viscosity and various additives on the wear of roller chains**. Wear, v. 108, n. 4, p. 303-321, 1986.
- XU, S.; WANG, Y.; MENG, F. **Study on the reliability evaluation method of the wear life of roller chains**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, v. 220, n. 10, p. 1569-1574, 2006.
- HOLLINGWORTH, N. E. **A four-square chain wear rig**. Tribology international, v. 20, n. 1, p. 3-9, 1987.
- KIM, C.; SONG, J. **Development of lightweight fiber-reinforced composite pins for heavy load long pitch roller chains**. Composite Structures, v. 236, p. 111839, 2020.
- KÄRCHER, T.; SCHULLERUS, G. **Correlation-based condition monitoring of a roller chain**. Condition monitoring (CM) methods and technologies. Journal WCCM, 2017
- SAPPOK, D., MERZ, R., SAUER, B., KOPNARSKI, M.. **Surface Analysis of Chain Joint Components after Tribological Load and Usage of Antiwear Additives**. In: Conference Papers in Science. Hindawi, 2015.
- ZHOU, Y. **Mathematical modeling of chain drive geometries for a durability test rig**. Experimental Techniques, v. 40, n. 3, p. 1137-1146, 2016.
- MOXON, J. **Life determining factors used in chain selection**. CME-CHARTERED MECHANICAL ENGINEER, v. 26, n. 4, p. 51-54, 1979.
- CONWELL, J. C.; JOHNSON, G. E. **Design, construction and instrumentation of a machine to measure tension and impact forces in roller chain drives**. Mechanism and machine theory, v.31, n.4, p.525-531, 1996
- RADCLIFFE, S. J. **Wear mechanisms in unlubricated chains**. TRIBOLOGY international, v. 14, n. 5, p. 263-269, 1981.