

TABELA DINÂMICA PARA O CÁLCULO DA POTÊNCIA EM UM SISTEMA POR TRANSMISSÃO DE CORREIAS NO TRANSPORTE DE PEÇAS CERÂMICAS

Gustavo Menegaz Medeiros¹

Elvys Isaias Mercado Curi²

Resumo: O transporte de peças cerâmicas é realizado, em sua maioria, por meio de um sistema de transmissão de correias trapezoidais suportados por guias de arraste, onde seu tracionamento geralmente é realizado por motorreductores. Com o objetivo de facilitar o desenvolvimento de um projeto de transmissão de peças em uma linha cerâmica, este estudo analisa os principais componentes de um sistema de transmissão, com foco na automatização do cálculo da potência necessária para tracionar o sistema, evitando seu sobredimensionamento, e reduzindo o consumo de energia. O cálculo otimizado utiliza uma tabela dinâmica elaborado no *software* Microsoft Excel®. Com este método o projetista pode entrar com as variáveis, e a partir dos dados inseridos, o programa calculará a potência necessária para tracionar o sistema, considerando o número de peças e a massa destas, procurando a otimização da energia consumida, de modo que o projeto seja eficiente e econômico. Para validação dos cálculos obtidos através da tabela dinâmica, foi construído uma bancada de testes, simulando um trecho de linha cerâmica, onde realizou-se os ensaios com variação do número de peças tracionadas e a frequência de trabalho, e por meio da medição da corrente no motor, foi possível descobrir a potência utilizada no sistema para cada ensaio, possibilitando a comparação dos valores obtidos na tabela dinâmica. Por meio dos testes práticos, foi possível analisar o funcionamento do sistema e ajustar os parâmetros necessários para o cálculo da potência. A tabela dinâmica se mostrou eficiente na troca rápida de parâmetros, possibilitando a simulação de diferentes combinações de valores, e o cálculo da potência de forma instantânea. Os resultados encontrados alcançaram valores muito próximos aos extraídos da bancada de testes, evidenciando a confiabilidade e a validação do estudo.

Palavras-Chave: Potência. Transmissão. Correia. Cerâmica. Transporte.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos principais protagonistas no mercado mundial de revestimentos cerâmicos, ocupando a terceira posição em produção e a segunda posição em consumo. A maior concentração da produção se encontra nas regiões

¹ Graduando em Engenharia Mecânica. Ano 2022-2. E-mail: gmenegaz10@gmail.com

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

sudeste e sul e em expansão no Nordeste do país. Em 2019, foi alcançado a marca de 909 milhões de m² produzidos em território brasileiro (ANFACER, 2021). As cerâmicas estão aprimorando suas linhas de produções constantemente, sempre buscando novas tecnologias para o aumento da produtividade e qualidade em seus produtos, e a redução de custos e desperdícios desnecessários visando a competitividade no mercado.

Na indústria cerâmica, o transporte de pisos cerâmicos em uma linha de produção é realizado, em sua maioria, por meio de correias trapezoidais suportadas por guias de arraste, em um sistema de transmissão tracionado por motorreduzidores e polias. Para o dimensionamento deste sistema, é necessário conhecer os componentes atuantes e suas características mecânicas, para que se possa projetar e dimensionar a linha de transmissão de forma adequada. Diversas empresas que fornecem linhas cerâmicas não realizam um estudo em cima dos componentes atuantes no sistema de transporte, encontrando dificuldades na elaboração do projeto e selecionando componentes inadequados, ou terceirizando o projeto por não possuírem um conhecimento teórico do assunto.

Assim busca-se alternativa para facilitar o dimensionamento do sistema, em que um estudo potencial compreende a análise dos componentes atuantes no transporte das peças cerâmicas, tais como: o fluxo e as dimensões das peças transportadas, a velocidade da linha, a quantidade e o tipo de correias e guias utilizados, o número de eixos tracionados e as distâncias entre eles, para que ao final seja possível calcular a potência requerida do sistema.

A partir da análise destes dados é possível realizar o cálculo para elaboração de uma tabela dinâmica no programa Microsoft Excel®, onde os dados com as variáveis do sistema de transporte poderão ser inseridos, obtendo-se o cálculo da potência necessária para o tracionamento das peças na linha de produção. A validação dos cálculos teóricos deverá ser realizada pela comparação dos resultados do método analítico com o experimental, com os valores obtidos por meio dos ensaios na bancada de testes, que deve simular uma linha de transporte de peças cerâmicas.

O presente trabalho tem como objetivo: estudar os componentes para o dimensionamento de um sistema por transmissão de correias no transporte de peças cerâmicas e elaborar uma tabela dinâmica que permita automatizar o projeto de linha cerâmica, a partir de seus dados pré-estabelecidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A descrição dos principais elementos de um sistema de transmissão por correias é exposta de maneira breve, e posteriormente se descreve alguns conceitos teóricos para o cálculo analítico da potência do motor, considerando um projeto exemplo, proposto para o transporte de peças cerâmicas.

2.1 TIPOS E MÉTODOS DE TRANSPORTE COM TRANSMISSÃO POR CORREIA

Geralmente os transportadores de correia são tracionados por um ou mais acionamentos, interligados a tambores sustentados através de eixos e mancais de rolamentos, que por sua vez, tracionam esteiras ou correias de borracha para o transporte de material granulado. Cada transportador de correia possui características bastante individuais e peculiares conforme sua aplicação, que variam de acordo com o material a ser transportado, com o perfil do terreno e as distâncias, e com as diferentes elevações entre o carregamento e a descarga do material (NBR 6177, 1999 apud GELAIS, 2016).

Swinderman (2007) apud Santos et al. (2014), explica que para o cálculo de correias transportadoras, se empregam dois métodos: o Método Prático e Método CEMA. O primeiro se aplica a transportadores simples e de pequena capacidade, analisando as tensões na correia. O método CEMA, é aplicável a transportadores de vários portes, curtos ou longos, onde calcula-se inicialmente as tensões em cada lance da correia, e após, a potência de acionamento.

2.2 COMPONENTES DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO POR CORREIAS TRAPEZOIDAIS

O transporte por um sistema de transmissão por correias pode ser realizado com carga contínua, como grãos e pó, ou discreta, como perfis de madeira. No caso da transmissão por correias trapezoidais, no transporte de peças cerâmicas, a carga é discreta, não havendo normas ou métodos recomendáveis para este caso, diferentemente do transporte de cargas contínuas. Entre estes sistemas, há algumas semelhanças e diferenças, por isso a descrição dos componentes é imprescindível.

2.2.1 Correias

A correia é um dos meios mais antigos de transmissão de movimento. Se trata de um elemento flexível, onde sua transmissão é realizada essencialmente por atrito, resultante de uma compressão inicial entre a correia e a polia, originada de uma carga inicial quando estacionária (FILHO,2009).

Na indústria cerâmica, a maior parte do transporte de revestimento cerâmico é realizado através de correias. De acordo com Filho (2009), o grande sucesso na utilização das correias na indústria é devido, principalmente, aos seguintes fatores: facilidade na montagem e manutenção, ausência de lubrificantes, alta durabilidade, redução de choques e vibrações devido ao seu material, limitação de sobrecargas pela ação do deslizamento, permite grande variação de velocidades, e se adequa bem para grandes distâncias entre eixos.

Existe diversos tipos de correias para diferentes tipos de aplicações. Na indústria cerâmica, o mais comum utilizado no transporte, é a correia trapezoidal ou em “V”, ilustrado na Fig. 1. Por esse motivo, os cálculos para dimensionamento do sistema serão realizados com base neste perfil de correia.

Figura 1: Correia em “V” ou Trapezoidal.



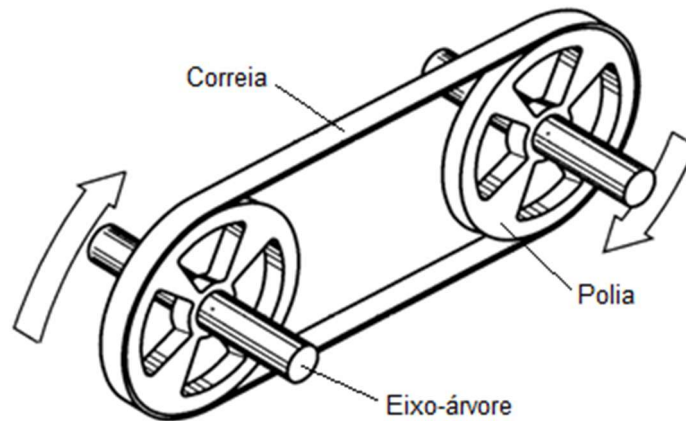
Fonte: Adaptado de Imes Dexis (2021)

2.2.2 Polias

A polia é um componente de forma cilíndrica, que é movimentada pela rotação do eixo motor, transferindo essa rotação para as correias. De acordo com Marat-Mendes (2003), na transmissão por polias e correias, a polia que transmite movimento e força é conhecida como polia motora ou condutora, já a polia que recebe,

é chamada de polia movida ou conduzida. Na Fig. 2 podemos observar a ilustração do componente no sistema.

Figura 2: Ilustração de um sistema de transmissão por correias.



Fonte: Adaptado de Marat-Mendes (2003)

2.2.3 Eixos-árvore

Os eixos-árvore são responsáveis por transmitir o movimento de rotação para as polias, podendo ser classificados no conjunto de transmissão, como eixo de tração, sendo o eixo acoplado a motorização, e o eixo movido, que tem o movimento de rotação livre e é tracionado pelo conjunto. Shigley et al. (2005), menciona que ele pode ser submetido a esforços de flexão, tração, compressão ou torção, atuando isoladamente ou de forma combinada. Na Fig. 2, podemos observar a sua função e o movimento que ele exerce, evidenciando sua importância em um sistema de transmissão por correias.

2.2.4 Acionamentos

O conjunto de acionamento de uma correia transportadora, se caracteriza pela junção do motor elétrico com um redutor, ou com acionamento por polias e correias em “V”, onde as aplicações variam de acordo com a potência, velocidade e condições econômicas. Para obtenção da redução de custos relacionados ao consumo de energia elétrica em uma empresa, a escolha correta do motor se torna um fator decisivo (SILVA, 2020).

Para redutores de velocidades, Silva (2020) explica que sua finalidade é reduzir a rotação de um acionador, sendo utilizado nos acionamentos por correias transportadoras, devido ao seu trabalho em baixa velocidade, onde auxiliam na redução da velocidade da esteira em relação ao seu eixo de trabalho.

Na Fig. 3, é possível verificar um motorreductor, que seria a união entre o motor elétrico e o redutor de velocidade (WEG, 2021).

Figura 3: Ilustração de um motorreductor



Fonte: Adaptado de WEG (2021)

2.3 FORÇAS ATUANTES NO SISTEMA

Existem diversas forças que atuam no tracionamento do sistema de transmissão por correias. Nesta seção serão abordadas as forças atuantes, suas características e as relações necessárias para o dimensionamento.

2.3.1 Momento torçor ou torque

De acordo com Melconian (1991), para as transmissões mecânicas, podemos definir o torque como o produto entre a força tangencial F_t e o raio r da peça. O cálculo pode ser expresso pela Eq. (1).

$$M_t = F_t \cdot r \quad (1)$$

Onde:

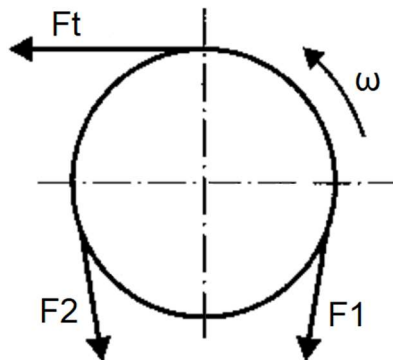
M_t = momento torçor ou torque (Nm);

F_t = força tangencial (N);

r = raio da polia (m).

A força tangencial F_t é uma resultante das forças F_1 e F_2 , sendo a responsável pelo movimento da polia. O motor aciona a transmissão por meio de uma força F_1 (motora). Porém, como em todo sistema de transmissão, existem forças, que se opõem ao movimento, que neste caso é chamada de F_2 (resistiva), como mostrado na Fig. 4 (MELCONIAN, 1991).

Figura 4: Esforços na polia de tração.



Fonte: Adaptado de Melconian (1991)

A força tangencial F_t pode ser expressa pela subtração de F_1 e F_2 , conforme Eq. (2) (MELCONIAN, 1991).

$$F_t = F_1 - F_2 \quad (2)$$

Onde:

F_1 = força motora (lado tenso) (N);

F_2 = força resistiva (lado frouxo) (N).

Para o acionamento do sistema, é necessário encontrar o torque de aceleração dinâmico, responsável por acelerar a carga no eixo de tração. O torque dinâmico τ_d pode ser expresso pela Eq. (3) (SEW-EURODRIVE, 2013).

$$\tau_d = \frac{\left(\frac{I}{\eta_t}\right) \cdot n_m}{9,55 \cdot t_a} \quad (3)$$

Onde:

τ_d = torque dinâmico (Nm);

I = momento de inércia (Kgm²);

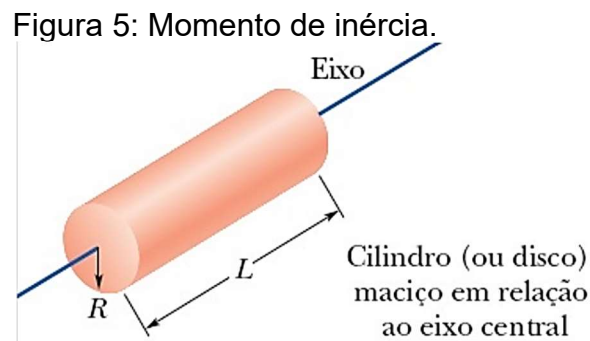
η_t = rendimento total (---);

n_m = rotação do motor (rpm);

t_a = tempo de acionamento (s).

2.3.2 Momento de inércia

De acordo com Halliday et al. (2016), o momento de inércia I depende da forma como a massa do corpo está distribuída em relação ao eixo de rotação. Seu cálculo varia de acordo com o comprimento L e o raio R , conforme ilustrado na Fig 5.



Fonte: Adaptado de Halliday (2016)

O momento de inércia I de um cilindro ou disco pode ser expresso conforme Eq. (4) (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

$$I_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \quad (4)$$

Onde:

m = massa do cilindro (Kg);

r = raio do cilindro ou disco (m);

I_c = momento de inércia do cilindro (Kgm²).

Todos os momentos de inércia de massa a serem acelerados devem ser referidos ao eixo do motor e somados, onde para se ter um ponto de referência comum

de momento de inércia da massa do motor e momento de inércia da massa externa, o momento de inércia de massa deve ser reduzido para o eixo do motor. Essa redução para um movimento circular, é expressa pela Eq. (5) (SEW-EURODRIVE, 2013).

$$I_{cr} = I_c \cdot \left(\frac{n_r}{n_m}\right)^2 \quad (5)$$

Onde:

I_{cr} = momento de inércia do cilindro reduzido ao eixo do motor (Kgm²);

n_r = rotação reduzida pelo redutor (rpm);

n_m = rotação do motor (rpm).

Da mesma forma para cilindros, também é possível encontrar o momento de inércia de uma massa movimentada linearmente e reduzida para o eixo do motor, através da Eq. (6) (SEW-EURODRIVE, 2013).

$$I_{pr} = 91,2 \cdot m \cdot \left(\frac{v_p}{n_m}\right)^2 \quad (6)$$

Onde:

I_{pr} = momento de inércia da peça cerâmica reduzida ao eixo do motor (Kgm²);

V_p = velocidade periférica (m/s);

m = massa da peça cerâmica (Kg).

2.3.3 Potência

Para o cálculo da potência no sistema, primeiramente é necessário o conhecimento da velocidade periférica e angular da correia. De acordo com Melconian (1991), é possível encontrá-las pelas Eq. (7) e Eq. (8), respectivamente.

$$V_p = \frac{\pi \cdot r \cdot n_m}{30} \quad (7)$$

$$\omega = \frac{V_p}{r} \quad (8)$$

Onde:

V_p = velocidade periférica (m/s);

ω = velocidade angular (rad/s).

A potência total P_t é a soma da potência estática P_e e dinâmica P_d . A potência estática está atrelada a velocidade constante, relacionando-se com as forças de atrito e gravitacionais. A potência dinâmica, seria a necessária para acelerações e desacelerações. O cálculo da potência total, estática e dinâmica, pode ser expresso pelas Eq. (9), Eq. (10) e Eq. (11), respectivamente (SEW-EURODRIVE, 2013).

$$P_t = P_e + P_d \quad (9)$$

$$P_e = \frac{Mt \cdot \omega}{\eta_t \cdot 1000} \quad (10)$$

$$P_d = \frac{\tau_d \cdot n_m}{9550} \quad (11)$$

Onde:

P_t = potência total (kW);

P_e = potência estática (kW);

P_d = potência dinâmica (kW).

2.3.4 Rendimentos

O rendimento total η_t da instalação se compõe pela multiplicação de todos os rendimentos unitários no acionamento, onde geralmente são: rendimento do redutor η_G e rendimento da carga η_L . O rendimento total é considerado distintamente para potência estática e dinâmica e ele pode ser encontrado através da Eq. (12) (SEW-EURODRIVE, 2013).

$$\eta_t = \eta_G \cdot \eta_L \quad (12)$$

Onde:

η_G = rendimento do redutor (---);

η_L = rendimento da carga (---).

Os rendimentos da carga η_L , que também podem ser chamados de rendimentos para elementos de transmissão, estão listados conforme a Tab. 1 (SEW-EURODRIVE, 2013).

Tabela 1 – Rendimentos para elementos de transmissão.

Elementos de Transmissão	Condições	Rendimentos (η_1)
Cabo de aço	Por volta completa da polia para cabos (mancal com bucha, ou de rolamento)	0,91 – 0,95
Correia em V	Por volta completa da polia (tensão da correia, normal)	0,88 – 0,93
Correia de material sintético	Por volta completa/rolos com mancal de rolamento (tensão da correia, normal)	0,81 – 0,85
Correia de borracha	Por volta completa/rolos com mancal de rolamento (tensão da correia, normal)	0,81 – 0,85
Correia dentada	Por volta completa/rolos com mancal de rolamento (tensão da correia, normal)	0,90 – 0,96
Correntes	Por volta completa/engrenagens com mancal de rolamento (em função do tamanho da corrente)	0,90 – 0,96

Fonte: Baseado em Sew-Eurodrive (2013)

Como observado na Tab. 1, o rendimento para elementos de transmissão é encontrado a partir do número de voltas completas. Deste modo, o cálculo do rendimento da carga η_L pode ser expresso pela Eq. (13) (SEW-EURODRIVE, 2013).

$$\eta_L = \eta_1^x \quad (13)$$

Onde:

η_1 = rendimento da carga por volta completa (---);

x = número de voltas completas (---).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

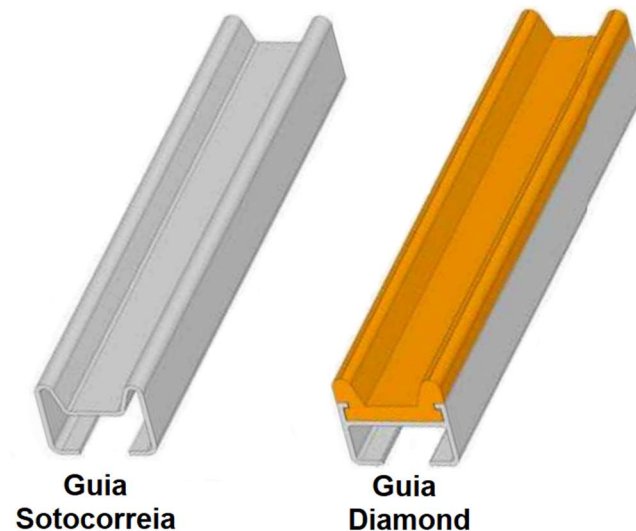
As etapas do procedimento experimental descrevem a metodologia utilizada para calcular a potência requerida para o sistema de transmissão.

Inicialmente foi importante determinar o coeficiente de atrito entre os guias de arraste e a correia, para depois elaborar a tabela dinâmica com a automatização dos cálculos. Posteriormente foi necessário ter o modelo e os materiais utilizados para construção da bancada de teste, e a metodologia para comprovar os resultados obtidos.

3.1 GUIAS DE ARRASTE

Os guias de arraste são muito comuns na indústria cerâmica. Eles possuem a função guiar as correias e servir como apoio para suportar o peso das peças que estão sendo transportadas. Existem diversos tipos de guias, que variam de acordo com a aplicação de cada trecho do transporte. Os mais comuns são os guias Diamond, composto por um perfil de alumínio inferior e um guia feito de material sintético resistente ao desgaste, e os guias Sotocorreia, fabricados inteiramente em aço. Na Fig. 6 se observa a ilustração dos dois modelos.

Figura 6: Guias mais comuns utilizados na indústria cerâmica.



Fonte: Adaptado de Servitech (2021).

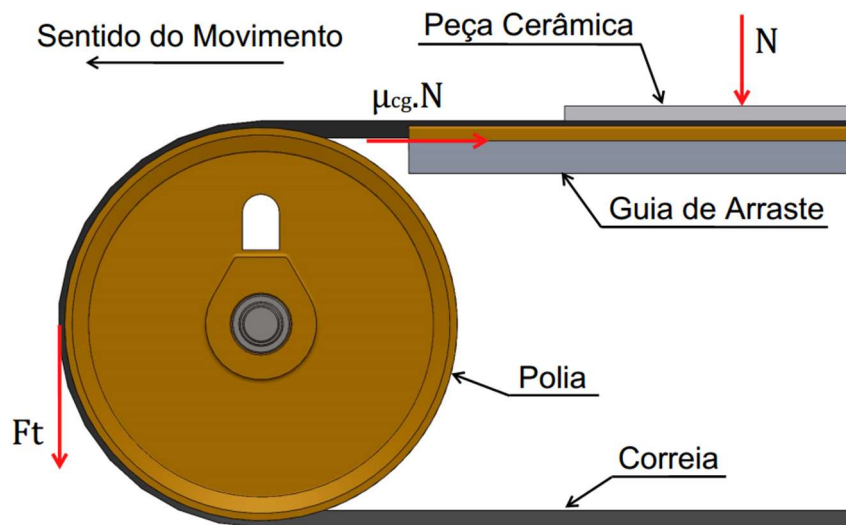
3.2 ETAPAS PARA O CÁLCULO DA POTÊNCIA

Para o cálculo da potência, primeiramente foi necessário analisar como os componentes do sistema se comportavam no conjunto de transmissão. Para melhor entendimento, foi observado o comportamento com apenas um único conjunto de

transmissão, composto por eixo, polia de tração, correia, guia de arraste e a peça cerâmica a ser transportada.

A Fig. 7, ilustra uma parte do conjunto de transmissão, onde se observa que existe uma força peso N , exercido pela peça cerâmica, que combinado com o coeficiente de atrito entre a correia e o guia de arraste μ_{cg} , geram uma força de atrito contrária ao movimento da peça.

Figura 7: Forças atuantes no sistema de transmissão.



Fonte: Do autor (2022)

Assim, para vencer a inércia, e tracionar o sistema é necessário encontrar a força tangencial F_t , que pode ser expressa pela Eq. (14).

$$F_t = \mu_{cg} \cdot N \quad (14)$$

Onde:

F_t = força tangencial (N);

μ_{cg} = coeficiente de atrito entre correia e guia de arraste (---);

N = Força normal (N).

A determinação da força normal N , necessária para calcular a força tangencial F_t , foi encontrada por meio da Eq. (15).

$$N = m \cdot g$$

(15)

Onde:

m = massa total das peças cerâmicas (Kg);

g = aceleração da gravidade (m/s^2).

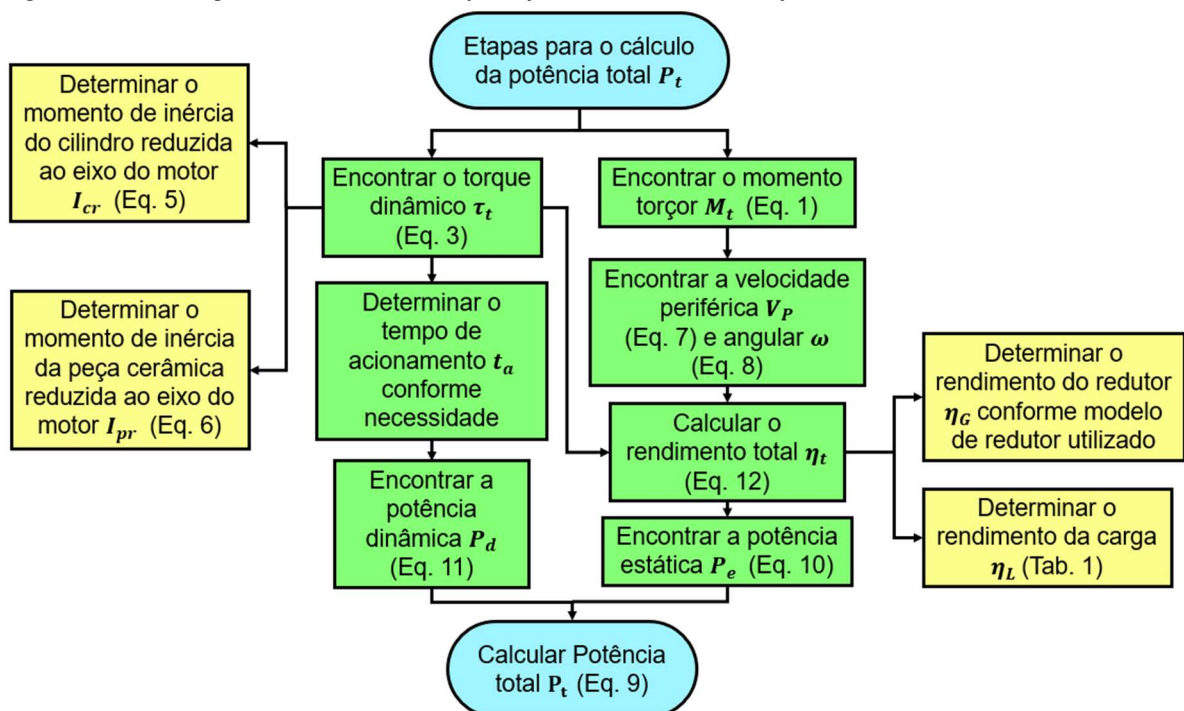
O cálculo da massa das peças cerâmicas a serem transportadas, foi determinada com o volume da peça cerâmica multiplicado pela massa específica do material. A massa influencia na força normal, que por sua vez, depende do número de peças cerâmicas tracionadas na correia de transporte.

O peso das correias foi desconsiderado nos cálculos, por não possuírem um valor relevante que possa interferir nos resultados.

Com o cálculo da força tangencial F_t , foi possível obter o valor do momento torçor M_t , calculado pela Eq. (1).

Para o cálculo da potência total P_t , necessária para o tracionamento do sistema, foi necessário encontrar a potência estática P_e e dinâmica P_d . Os passos para o cálculo estão descritos no fluxograma conforme Fig. 8.

Figura 8: Fluxograma com as etapas para o cálculo da potência.



Fonte: Do autor (2022)

3.3 ENSAIO PARA ENCONTRAR O COEFICIENTE DE ATRITO

Para encontrar o coeficiente de atrito entre os guias de arraste e a correia, foram realizados ensaios num Tribômetro, utilizando o método de pino sobre disco. Neste ensaio se seguiu as recomendações da norma ASTM G99-04 (2013), determinando-se o coeficiente de atrito entre a correia e o guia de arraste em aço, e entre a correia e o guia de arraste em material sintético. A ilustração do ensaio é apresentada na Fig. 9.

Figura 9: Ensaio para calcular o coeficiente de atrito utilizando o método pino sobre disco.



Fonte: Do autor (2022)

Os parâmetros utilizados no tribômetro foram selecionados com o objetivo de simular o transporte em uma linha cerâmica. Se realizou 3 ensaios em cada conjunto de materiais. Os dados de entrada selecionados estão expressos na Tab. 2.

Tabela 2 – Dados de Entrada do Tribômetro

Tempo de cada Ensaio (s)	2000
Raio da Trilha (mm)	20
Rotação do Disco (RPM)	398
Força Normal (N)	9,8

Fonte: Do Autor (2022)

Os valores do raio da trilha e da rotação do disco, foram obtidos em função da velocidade tangencial do disco, que foi semelhante à velocidade média de uma linha cerâmica, com o valor aproximado de 50 m/min.

3.4 ELABORAÇÃO DA TABELA DINÂMICA

Para facilitar o cálculo da potência no projeto de dimensionamento de um sistema de transporte para linha cerâmica, foi elaborado uma tabela dinâmica por meio do *software* Microsoft Excel®.

Após a realização das etapas do cálculo da potência, foram inseridas todas as equações necessárias na tabela dinâmica, onde o projetista pode inserir os dados de entrada com as variáveis do sistema de transmissão e calcular de forma simultânea, as diferentes combinações conforme o projeto da linha necessitar.

A tabela de cálculo foi dividida em três partes, sendo a primeira para preenchimento dos dados de entrada do sistema, onde o operador seleciona os parâmetros conforme o seu projeto necessitar. Ela pode ser observada na Tab. 3.

Tabela 3: Dados de entrada da tabela dinâmica.

DADOS DE ENTRADA DO SISTEMA	
Largura da peça cerâmica:	m
Comprimento da peça cerâmica:	m
Espessura da peça cerâmica:	mm
Massa específica da peça cerâmica:	Kg/m ³
Espaçamento entre as peças:	m
Diâmetro das polias:	mm
Número de correias:	adim.
Número de eixos tracionados:	adim.
Distância entre os eixos:	m
Frequência nominal do motor:	Hz
Frequência de trabalho do motor:	Hz
Rotação nominal do motor:	rpm
Rotação do motor na frequência:	rpm
Redução do redutor:	adim.
Perfil da correia:	adim.

Fonte: Do autor (2022)

A segunda parte se refere a tabela de dados adicionais, que calcula de forma automática os dados inseridos na tabela inicial. Ela está expressa na Tab. 4, onde o operador observaria alguns dados importantes de seu sistema de transmissão.

Tabela 4: Dados adicionais calculados da tabela dinâmica.

DADOS ADICIONAIS CALCULADOS	
Massa unitária da peça cerâmica:	Kg
Massa total das peças cerâmicas:	Kg
Número de peças por minuto:	adim.
Número de peças tracionadas no trecho:	adim.
Velocidade da linha:	m/min
Número de vãos:	adim.
Comprimento total do trecho:	m
Rotação no eixo:	rpm
Diâmetro do eixo:	mm
Comprimento do eixo:	mm
Massa específica do aço:	Kg/m ³
Massa unitária do eixo:	Kg
Massa total dos eixos	Kg
Largura da polia:	mm
Massa unitária da polia:	Kg
Massa total das polias:	kg
Quantidade total de polias:	adim.

Fonte: Do autor (2022)

Na terceira parte, temos a tabela final, que se refere aos cálculos dos esforços, e a potência necessária para o tracionamento do sistema de transmissão. Ela pode ser observada conforme a Tab. 5.

Tabela 5: Cálculos finais da tabela dinâmica.

CÁLCULOS	
Momento torçor (Mt):	Nm
Força tangencial (Ft):	N
Raio da polia (r):	m
Força motora (F1):	N
Força resistiva (F2):	N
Força de atrito (F _{atrito}):	N
Velocidade periférica (V _p):	m/s
Rotação da polia (n):	rpm
Velocidade angular (ω):	rad/s
Potência estática (P _e):	W
Potência estática (P_e):	kW
Potência estática (P _e):	CV
Coef. de atrito entre correia e guia (μ_{cg}):	adim.
Força normal (N):	N
Gravidade (g):	m/s ²
Torque dinâmico (td):	Nm
Momento de inércia do eixo:	Kgm ²
Momento de inércia da polia:	Kgm ²
Momento de inércia do eixo + polia:	Kgm ²
Momento de inércia (eixo+polia) reduzido (I _{cr}):	Kgm ²
Momento de inércia da peça reduzido (I _{pr}):	Kgm ²

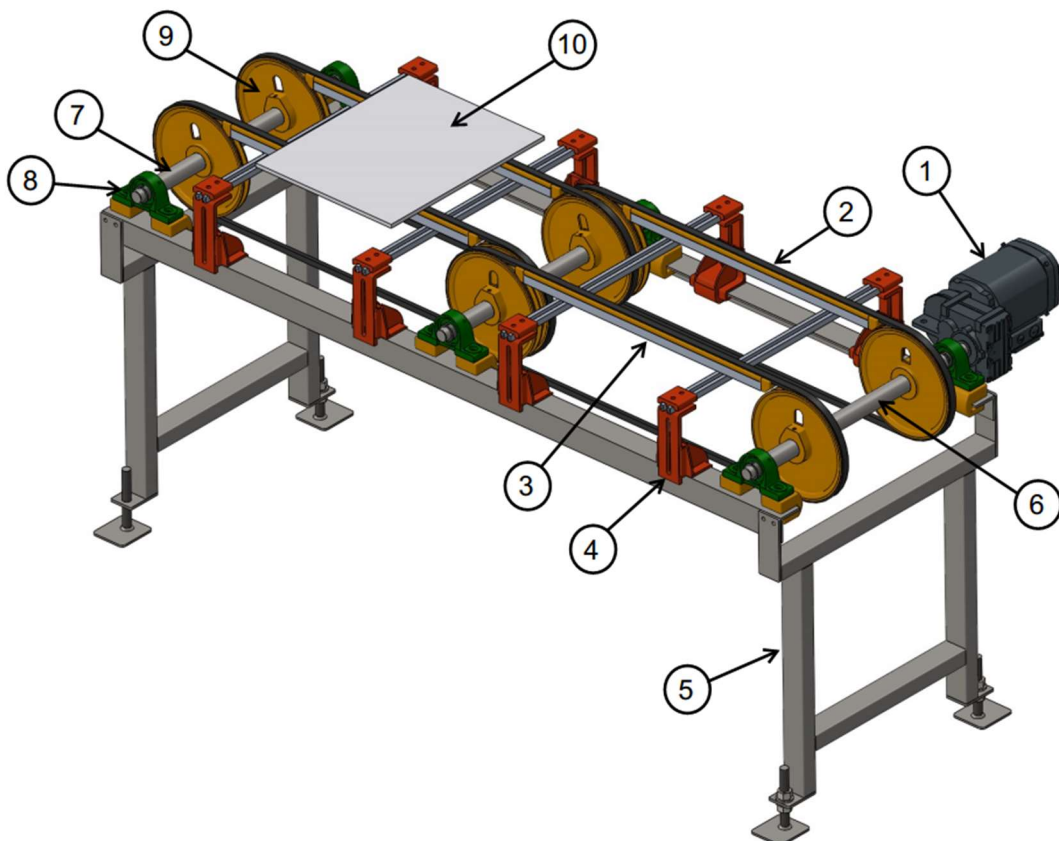
Momento de inércia total calculado (I):	Kgm ²
Rendimento do redutor (η_G):	adim.
Rendimento da carga (η_L):	adim.
Rendimento total (η_t):	adim.
Tempo de acionamento (tA)	s
Aceleração de partida (ap)	m/s ²
Potência dinâmica (Pd):	W
Potência dinâmica (Pd):	kW
Potência dinâmica (Pd):	CV
Potência total (Pt)	kW

Fonte: Do autor (2022)

3.5 CONSTRUÇÃO DA BANCADA DE TESTES

A bancada de testes, foi construída com a finalidade de comprovar os resultados obtidos pela sequência de cálculos. Ela simula o transporte de peças cerâmicas através do sistema de transmissão de correias, que segue o padrão utilizado na indústria cerâmica. Na Fig. 10 é possível visualizar sua estrutura e os componentes utilizados no projeto de sua construção.

Figura 10: Desenho ilustrativo da bancada de testes.



Fonte: Do autor (2022)

Os materiais utilizados na bancada, são listados na Tab. 6 e cada componente pode ser identificados por suas numerações, conforme a Fig. 10.

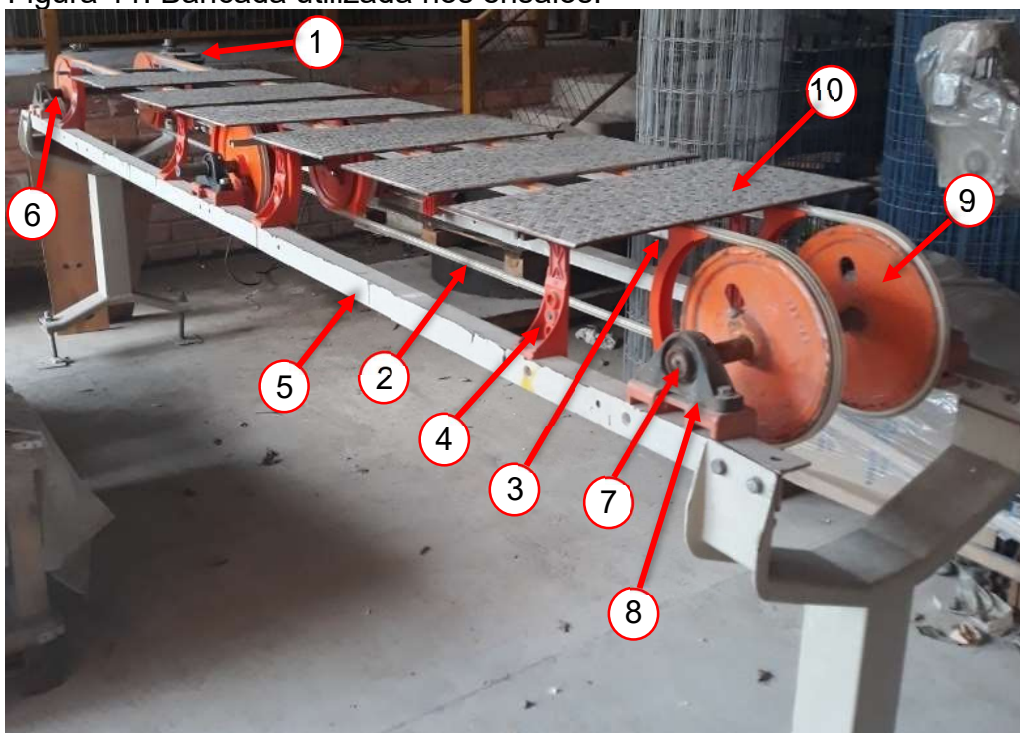
Tabela 6 – Materiais na bancada.

Nº	Qtde	Descrição
1	1	Motorreductor rosca sem-fim 0,37 kW i 1:14
2	4	Correia soldável de poliuretano canal B
3	4	Guia de arraste Diamond Plus FM canal B
4	4	Conjunto de fixação do guia de arraste
5	1	Bancada (Dimensões: L=500 x C=3600 mm)
6	1	Eixo de Tração Ø30 mm
7	2	Eixo Movido Ø30 mm
8	6	Conjunto de mancal P206 montado
9	8	Polia Ø265 mm Canal B
10	-	Peça Cerâmica 395 x 395 x 9 mm

Fonte: Do autor (2022)

A construção da bancada de testes, fabricada conforme as especificações da lista de matérias e disponível para os ensaios, é apresentado na Fig. 11.

Figura 11: Bancada utilizada nos ensaios.



Fonte: Do autor (2022)

3.6 METODOLOGIA UTILIZADA NA COMPROVAÇÃO DOS CÁLCULOS

O principal objetivo do conjunto de sequencias dos cálculos, é encontrar a potência requerida para tracionar o sistema de transporte de peças. A comprovação dos cálculos se realizou na bancada de testes, que simula o transporte de peças.

Após a montagem da bancada, com os materiais mencionados na Tab. 6, foram realizados os testes, com a finalidade de descobrir a potência utilizada para tracionar o sistema de transmissão.

Na realização dos testes, primeiro foi energizado o sistema na rede elétrica, com tensão trifásica de 380V. Após energização, o acionamento do motorreductor foi feito com a utilização de um inversor de frequência da marca Toshiba, modelo VFS15-4015ND3W1, de 3CV. A imagem do inversor pode ser observada na Fig. 12.

Figura 12: Inversor de frequência.



Fonte: Do autor (2022)

A velocidade necessária para o funcionamento do sistema transportador de peças cerâmicas é de 50 m/min, o qual seria o valor médio utilizado nas linhas cerâmicas para o transporte, sendo este, o valor buscado na realização dos testes. A frequência ajustada no inversor de frequência, para alcançar essa velocidade, seria aproximadamente 30 Hz. Por isso, os testes foram realizados variando a frequência entre 20, 30 e 40 Hz, obtendo uma margem para análise abaixo e acima da frequência ideal.

O primeiro teste foi feito sem nenhuma peça sendo tracionada, apenas o sistema de transmissão com eixos, polias, guias de arraste e correias. O segundo teste foi realizado tracionando 1 peça cerâmica, o terceiro com 2 peças, o quarto com 4 peças, o quinto com 6 peças, e o sexto e último teste com 8 peças. As peças cerâmicas utilizadas no ensaio têm formato com dimensões de: 395 x 395 x 9 mm.

Para descobrir a potência real P_r , utilizada no sistema, foi utilizado como base a Eq. (16), onde a partir da medição da corrente elétrica no motor, foi possível estimar a potência que estava sendo consumida pelo motor durante a realização dos testes (WEG, 2021).

$$P_r = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi \cdot \eta_m}{1000} \quad (16)$$

Onde:

P_r = potência real do sistema (kW);

U = tensão elétrica (V);

I = corrente elétrica (A);

$\cos \phi$ = Ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente de fase (---);

η_m = rendimento do motor (---).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os cálculos da potência utilizando os métodos prático e de CEMA (SANTOS et al. 2014), não foram apropriados para o transporte de peças cerâmicas, por serem corpos sólidos, separados entre si. Esses métodos foram criados para o transporte de materiais que possuem características de cargas contínuas e agrupadas, como por exemplo os grãos, onde é necessário a utilização de correias amplas, tracionadas por tambores, ocasionando maior consumo de energia.

4.1 ENSAIO PARA ENCONTRAR COEFICIENTE DE ATRITO

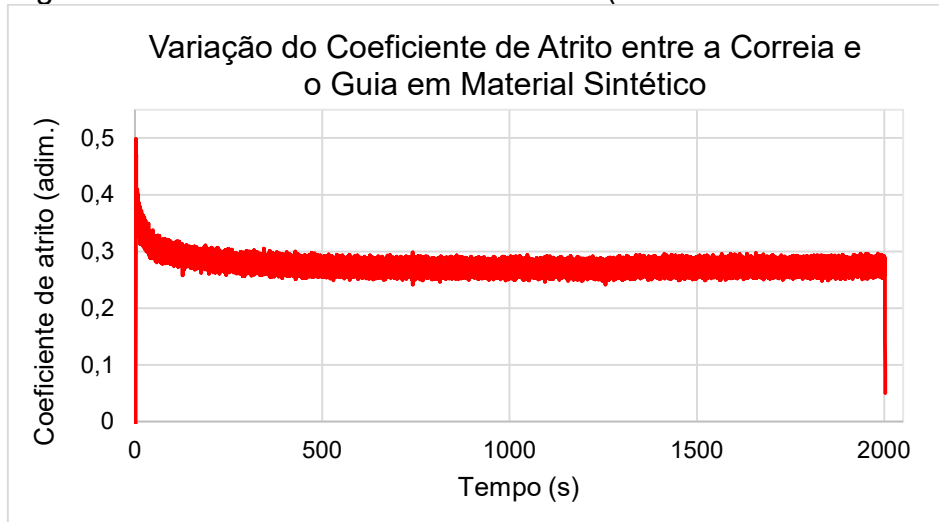
Por meio dos ensaios realizados no tribômetro, foi possível chegar a uma estimativa do valor do coeficiente de atrito entre os guias de arraste e a correia. O

deslizamento gera uma força contrária ao movimento da peça, influenciando no valor de potência consumida pelo motorreductor durante o funcionamento de seu transporte.

Após a análise dos resultados do equipamento, registrado pelo *software* LabView®, foi gerado os arquivos em formato de texto (txt), e importado para o *software* Microsoft Excel®, onde foi possível fazer a leitura dos valores, gerando seus respectivos gráficos e encontrando a média entre eles.

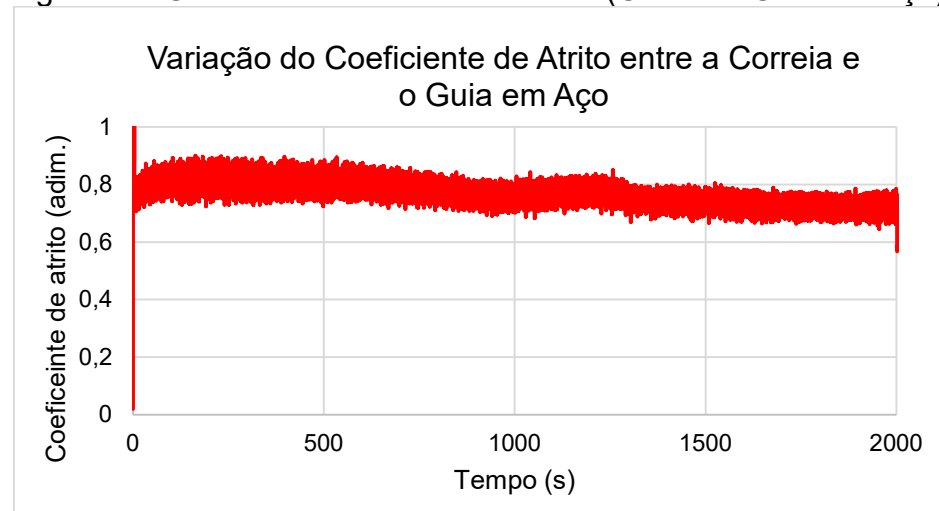
Foram realizados três ensaios em cada conjunto de amostras, porém, como os resultados obtidos apresentaram gráficos muito semelhantes, foi selecionado apenas um de cada análise. Os sinais do coeficiente de atrito no tempo podem ser observados nos gráficos das Fig. 13 e Fig. 14, respectivamente.

Figura 13: Gráfico do coeficiente de atrito (Correia - Guia Sintético)



Fonte: Do autor (2022)

Figura 14: Gráfico do coeficiente de atrito (Correia - Guia em Aço)



Fonte: Do autor (2022)

Na Tab. 7 está expresso a média calculada para cada ensaio, bem como a média resultante entre eles.

Tabela 7 – Coeficientes de atrito encontrados.

Coeficiente de Atrito entre Correia e Guia em Material Sintético (Diamond)		Coeficiente de Atrito entre Correia e Guia em Aço	
Nº do ensaio	Coef. Médio	Nº do ensaio	Coef. Médio
1	0,274	1	0,773
2	0,287	2	0,772
3	0,300	3	0,770
Média Final	0,287	Média Final	0,772

Fonte: Do autor (2022)

Para facilitar o cálculo da potência, foi determinado o coeficiente de atrito médio entre os dados obtidos, com o intuito de encontrar um valor único a ser utilizado. Além de facilitar o cálculo, esse valor médio se aproximou melhor aos resultados esperados no cálculo da potência, pois não resultou um valor muito baixo, representado pelo guia em material sintético, e nem muito elevado, representado pelo guia em aço. O valor do coeficiente de atrito médio utilizado no cálculo da potência pode ser observado na Tab. 08.

Tabela 8 – Coeficiente de atrito médio.

Coeficiente de Atrito entre Correia e Guia em Material Sintético	0,287
Coeficiente de Atrito entre Correia e Guia em Aço	0,772
Coeficiente de Atrito Médio	0,529

Fonte: Do autor (2022)

4.2 CÁLCULOS OBTIDOS NA TABELA DINÂMICA

Após de preencher a tabela dinâmica, com os dados de entradas para o cálculo das potências, se obteve os valores de cada simulação. O uso desta informação possibilitou a alteração dos parâmetros e a observação dos resultados de forma automática e instantânea. Os resultados obtidos nas simulações são apresentados na Tab. 9.

Tabela 9 – Simulações na tabela dinâmica.

1° Simulação (0 Peça)		2° Simulação (1 Peça)		3° Simulação (2 Peças)	
F (Hz)	P (kW)	F (Hz)	P (kW)	F (Hz)	P (kW)
20	0,002	20	0,018	20	0,032
30	0,005	30	0,029	30	0,051
40	0,009	40	0,041	40	0,071
4° Simulação (4 Peças)		5° Simulação (6 Peças)		6° Simulação (8 Peças)	
F (Hz)	P (kW)	F (Hz)	P (kW)	F (Hz)	P (kW)
20	0,062	20	0,092	20	0,122
30	0,097	30	0,142	30	0,187
40	0,133	40	0,194	40	0,257

Fonte: Do autor (2022)

Os parâmetros de entrada foram inseridos na tabela dinâmica, depois foi selecionado os valores calculados e foi possível relacionar com os resultados dos ensaios práticos da bancada. Estes valores serão mostrados e comparados posteriormente.

4.3 COMPROVAÇÃO DOS CÁLCULOS NA BANCADA DE TESTES

Com os valores da potência total calculadas na tabela dinâmica, foi possível correlacionar com os resultados da bancada de testes. O cálculo da potência elétrica, obtida por meio da medição de corrente e pela Eq. 16, permitiram a comparação de diferentes condições de uso da bancada. Com a variação da quantidade de peças tracionadas, se obteve diferentes potências solicitadas. Os valores calculados da potência elétrica, com os dados de corrente, são apresentados na Tab. 10.

Tabela 10 – Resultado dos testes na bancada.

1° Teste (0 Peça)			2° Teste (1 Peça)			3° Teste (2 Peças)		
F (Hz)	I (A)	P (kW)	F (Hz)	I (A)	P (kW)	F (Hz)	I (A)	P (kW)
20	0,48	0,173	20	0,50	0,180	20	0,56	0,202
30	0,55	0,198	30	0,55	0,198	30	0,60	0,216
40	0,61	0,220	40	0,61	0,220	40	0,64	0,231
4° Teste (4 Peças)			5° Teste (6 Peças)			6° Teste (8 Peças)		
F (Hz)	I (A)	P (kW)	F (Hz)	I (A)	P (kW)	F (Hz)	I (A)	P (kW)
20	0,71	0,256	20	0,78	0,281	20	N/A	N/A
30	0,72	0,259	30	0,80	0,288	30	0,95	0,342
40	0,74	0,267	40	0,82	0,295	40	0,96	0,346

Fonte: Do autor (2022)

Os campos marcados como “N/A”, na Tab. 10, se referem ao teste em que o motorreductor não teve força para tracionar as peças, ou seja, todo o sistema se manteve em repouso. Com esse dado, se percebeu uma boa escolha no motor elétrico selecionado, pois a potência elétrica, permitiu o funcionamento da redução do motorreductor, para testes práticos até certos limites. O comportamento em “N/A”, evidenciou que o sistema não está sobre dimensionado, pois ao chegar na carga máxima de peças cerâmicas, no valor de 20 Hz, acabou não possuindo potência suficiente para tracionar as peças. Apenas quando foi aumentado a velocidade, alcançou uma potência muito próxima à potência máxima do motor, que é de 0,37 kW. Também foi observado que sua potência consumida veio crescendo gradativamente conforme a carga foi aumentando.

Comparando os resultados obtidos nas Tab. 9 e 10, foi possível perceber a diferença no valor final de potência encontrado entre os cálculos teóricos e os testes práticos na bancada. A partir da análise dos resultados, se observou que a diferença entre as potências encontradas nos dois métodos, resultavam em valores que seguiam um determinado padrão. Com isso, foi sugerido que além da potência estática e dinâmica para tracionar o sistema, existe uma potência mínima de acionamento utilizada pelo motorreductor, e que deve ser adicionado nos cálculos para obtenção de valores mais aproximados à realidade.

Para definição do valor da potência mínima de acionamento, foi realizado uma medição da corrente do motorreductor à vazio, ou seja, com ele desacoplado do sistema de transmissão. Os resultados obtidos no ensaio podem ser analisados na Tab. 11.

Tabela 11 – Medição do motorreductor à vazio

F (Hz)	I (A)	P (kW)
20	0,47	0,169
30	0,51	0,184
40	0,58	0,209

Fonte: Do autor (2022)

Com os valores de potência extraídos das medições, foi possível recalcular a potência teórica na tabela dinâmica, agora com a adição da potência mínima de acionamento. Foi acrescentado o valor de potência equivalente a cada faixa de

frequência medida. Os resultados finais, dos cálculos teóricos a partir da tabela dinâmica, com os parâmetros ajustados, são apresentados na Tab. 12.

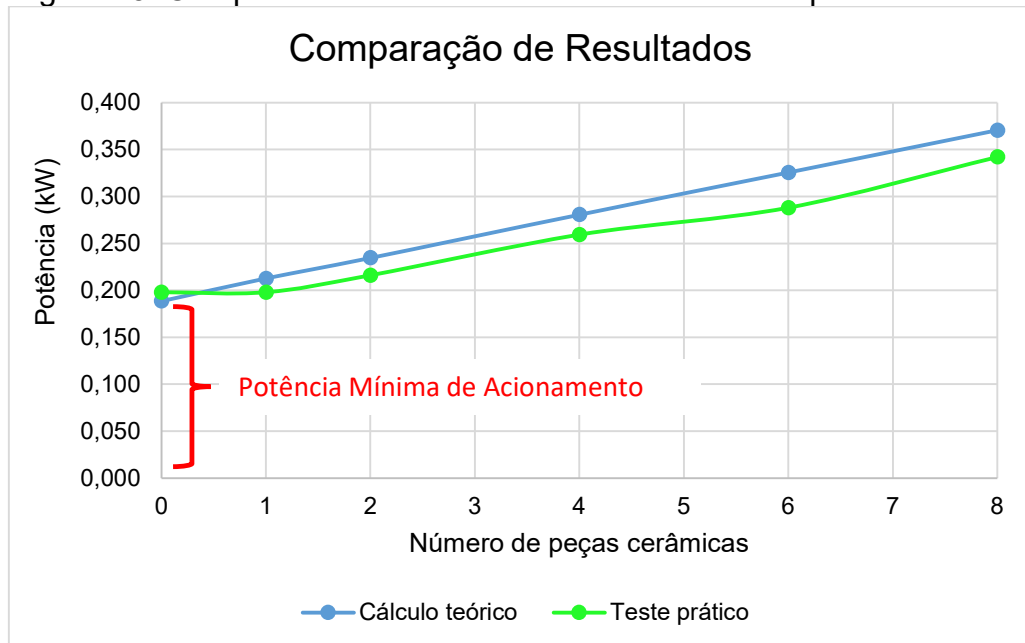
Tabela 12 – Resultados do cálculo teórico da potência.

1° Teste (0 Peças)		2° Teste (1 Peça)		3° Teste (2 Peças)	
F (Hz)	P (kW)	F (Hz)	P (kW)	F (Hz)	P (kW)
20	0,171	20	0,187	20	0,201
30	0,189	30	0,213	30	0,235
40	0,218	40	0,250	40	0,280
4° Teste (4 Peças)		5° Teste (6 Peças)		6° Teste (8 Peças)	
F (Hz)	P (kW)	F (Hz)	P (kW)	F (Hz)	P (kW)
20	0,231	20	0,261	20	0,291
30	0,281	30	0,326	30	0,371
40	0,342	40	0,403	40	0,466

Fonte: Do autor (2022)

A diferença entre os resultados dos cálculos teóricos e dos testes práticos, pode ser analisado conforme o comparativo realizado, apresentado na Fig. 15.

Figura 15: Comparativo entre o cálculo teórico e o teste prático.



Fonte: Do autor (2022)

Neste comparativo foi levado em consideração os resultados obtidos na frequência de 30 Hz, que seria a frequência equivalente a velocidade aproximada de 50 m/min (velocidade média utilizada nas linhas cerâmicas).

A partir da análise do gráfico, é perceptível a linearidade dos resultados, e a diferença aceitável entre os dois métodos utilizados para encontrar a potência. Com a adição da potência mínima de acionamento foi possível chegar ao resultado esperado e apresentar com êxito o estudo realizado.

Apesar dos bons resultados obtidos, é necessário ressaltar que para um resultado mais preciso, seria necessário a medição da tensão para cada teste realizado, pois a medição da corrente foi feita a partir da variação da frequência, em um inversor do tipo vetorial. Este inversor possui algoritmos no software de controle, que por sua vez, alteram a tensão e a frequência de maneira que o torque se ajuste de acordo com a necessidade.

5 CONCLUSÕES

Com a comparação dos resultados obtidos através dos cálculos teóricos e testes práticos, é perceptível a necessidade da bancada de testes para validação do estudo. Analisando os resultados expressos através dela, foi possível enxergar a potência mínima de acionamento consumida pelo motorreductor, mostrando que apenas no âmbito teórico, seria difícil perceber este dado, além de impossibilitar a comparação com os resultados obtidos pela tabela dinâmica, prejudicando a confiabilidade do estudo.

Na simulação dos resultados, com o uso da tabela dinâmica desenvolvida, foi possível perceber a facilidade do cálculo da potência, e a rapidez na troca de parâmetros necessárias para cada tipo de carga simulada. Essa tabela demonstrou a otimização do tempo de projeto de uma linha cerâmica, onde com apenas a seleção dos dados de entrada, foi possível chegar à potência necessária para tracionar o sistema, possibilitando análises rápidas com o objetivo de chegar aos parâmetros ideais para cada tipo de projeto e necessidade.

É necessário também, ressaltar a precisão na seleção dos motorredutores, com a utilização da tabela dinâmica no projeto. Muitas vezes, na seleção da motorização, é escolhido motorredutores sobredimensionados, causando um desperdício financeiro e de energia. Com esta ferramenta, este problema é reduzido de forma considerável, levando em conta que os cálculos alcançaram resultados muito próximos ao consumo real de energia pelo motorreductor.

Apesar dos ótimos resultados obtidos no estudo, houve algumas limitações nos ensaios da bancada de testes que poderiam ser aprimorados. Para melhores resultados, o ideal seria uma bancada mais comprida para realização dos ensaios, assim, seria possível obter maior estabilização na medição da corrente do motor, e conseqüentemente, resultados mais precisos. Outra sugestão que agregaria ao estudo e a tabela dinâmica, seria a realização dos ensaios com diversos modelos de motorreductores, variando a potência do motor e a redução do reductor, e a partir dos resultados, a criação de uma tabela com as potências mínimas de acionamento que devem ser acrescentadas para cada modelo de motorreductor, por exemplo.

De modo geral, é notável a importância deste trabalho, não só para o projeto de uma linha cerâmica, mas para o estudo do comportamento dos motorreductores quando sujeitos a cargas deste tipo, expressas nos ensaios práticos. O conteúdo desenvolvido neste estudo é de extrema valia, tendo em vista a escassez do mesmo, quando relacionamos o tracionamento de cargas por meio de um sistema de correias trapezoidais, um tema muito importante para indústria em geral, principalmente nas cerâmicas.

REFERÊNCIAS

ALVES, Marcelo A. L., [s.d.]. **Transmissão por correias**. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5804241/mod_resource/content/1/TRANSMISS%C3%B5ES%20POR%20CORREIAS.pdf>. Acesso em: 23 de abr. de 2021.

ANFACER. Anfacer, c2021. **Números do setor de revestimentos cerâmicos**. Disponível em: <<https://www.anfacer.org.br/numeros-do-setor>>. Acesso em: 26 de mar. de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR-6177. **Transportadores contínuos – Transportadores de correia – Terminologia**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1999.

AZEVEDO, Domingos F. O., 2016. **Transmissão com polias e correias**. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/29701717-Transmissao-com-polias-e-correias.html>>. Acesso em: 27 de abr. de 2021.

FILHO, Flávio de Marco. **Elementos de transmissão flexíveis**. 2º ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2009.

SILVA, Gabriel Masete. **Análise dos métodos Prático e CEMA para correias transportadoras e escolha do seu conjunto de acionamento sob a luz da eficiência energética**. Uberlândia: [s.n.], 2020.

GELAIS, Marcelo Alves. **Cálculo dinâmico de transportadores de correia: uma análise comparativa ao cálculo estático corroborada por medições de campo**. Belo Horizonte: [s.n.], 2016.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. Tradução: Ronaldo Sérgio de Biasi. 10° ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

IMES DEXIS. Imes, [s.d.]. **Correia trapezoidal ou em “V”**. Disponível em: <<https://www.imes.be/v-riem-conti-v-d-93-32x2360li-co.html>>. Acesso em: 30 de mar. de 2021.

MARAT-MENDES, Rosa. **Elementos de máquinas**. Setúbal, Portugal: [s.n.], 2003.

MELCONIAN, Sarkis. **Elementos de máquinas**. 9° ed. Rio de Janeiro: Érica, 1991.

SANTOS, D. A.; MALAGONI, R. A. **Projeto de correias transportadoras: um estudo computacional de comparação dos métodos CEMA e prático**. Rio Grande do Norte: HOLOS, v. 3, 2014.

SERVITECH, Servitech, [s.d.]. **Guias de arraste**. Disponível em: <https://www.servitech.com.br/PDF_perfil_para_correias.pdf>. Acesso em: 27 de mar. de 2021.

SEW-EURODRIVE. **Seleção de Acionamentos**. 9° ed. São Paulo: [s.n.], 2013.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de engenharia mecânica**. Tradução: João Batista de Aguiar, José Manoel de Aguiar. 7° ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

SWINDERMAN, R.T. CEMA (Conveyor Equipment Manufacturers Association) - **Belt Conveyors for Bulk Materials**, Chaners Publishing Company, Inc. 6 th edition, p.567, 2007.

WEG. **Guia de especificação motores elétricos**. Santa Catarina: [s.n.], 2021.