

IMPACTO NA VIDA ÚTIL DE ROLAMENTO DE ROLOS CÔNICOS UTILIZADOS EM CILINDROS CORRUGADORES: UM ESTUDO DE CASO

IMPACT ON THE SERVICE LIFE OF TAPERED ROLLER BEARINGS USED IN CORRUGATOR CYLINDERS: A CASE STUDY

77

Pedro Henrique Fray¹, Fabio Picolli¹, José Marcos Romão Júnior², Joaquim M. F. Antunes Neto³

1- Graduados no CST em Gestão da Produção Industrial, da FATEC – Itapira; 2- Especialista em Controladoria e Finanças (INPG – Brasil) e Coordenador do CST em Gestão da Produção Industrial da FATEC – Itapira; 3 – Doutor em Biologia Funcional e Molecular (Instituto de Biologia – UNICAMP), Especialista em Tecnologias da Indústria 4.0 (Faculdade Focus), MBA em Gestão de Estratégia Empresarial (Faculdade São Luís), Docente da FATEC - Itapira.

Contato: joaquim_netho@yahoo.com.br

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi compreender a deterioração prematura de rolamentos de rolos cônicos utilizados em rolos corrugadores, utilizando o método de *Weibull* com auxílio da ferramenta Microsoft Excel e a interpretação de dados obtidos por regressão linear. Tal análise deve ser rotina ativa do Engenheiro de Confiabilidade da produção industrial. A metodologia utilizada foi o estudo de caso, em uma empresa terceira colocada no Brasil deste segmento de embalagens de papelão ondulados. Após a detecção das causas raízes dos problemas investigados, sugeriu-se medidas de contenção para redução ou minimização dos problemas de vida útil nos rolamentos. As interações via software Excel foram essenciais para identificar melhor o problema estudado. A análise teve como premissa desenvolver uma metodologia de forma algébrica que possibilitasse a validação da vida útil dos rolamentos de rolos cônicos utilizados em cilindros corrugadores. Concluiu-se que foi de grande relevância a utilização das ferramentas aplicadas dentro dos processos, cujas causas dos problemas são subjetivas, pois elas subsidiaram o grupo de trabalho a uma análise mais profunda do fenômeno estudado, obtendo-se previsibilidade de falha do rolamento.

Palavras-Chave: Rolamento. Método *Weibull*. Cilindros corrugadores. Microsoft Excel. 5W2H.

ABSTRACT

The aim of this work was to understand the premature deterioration of tapered roller bearings used in corrugator rollers, using the Weibull method with the aid of Microsoft Excel and the interpretation of data obtained by linear regression. Such an analysis must be an active routine of the industrial production Reliability Engineer. The methodology used was the case study, in a third-placed company in Brazil in this segment of corrugated cardboard packaging. After detecting the root causes of the investigated problems, containment measures were suggested to reduce or minimize bearing life problems. Interactions via Excel software were essential to better identify the studied problem. The premise of the analysis was to develop a methodology in an algebraic way that would enable the validation of the service life of tapered roller bearings used in corrugator cylinders. It was concluded that the use of tools applied within the processes, whose causes of the problems are subjective, was of great relevance, as they subsidized the work group to a deeper analysis of the phenomenon studied, obtaining predictability of bearing failure.

Keywords: Bearing. Weibull Method. Corrugating cylinders. Microsoft Excel. 5W2H.

INTRODUÇÃO

No competitivo ambiente empresarial de hoje, um serviço rápido com tempo de espera mínimo é um dos fatores considerado pelos clientes para escolha de um serviço. Muitas organizações oferecem um prazo de entrega uniforme a todos os clientes, a fim de obter vantagens competitivas no mercado. Ao determinar um prazo para a cotação, a empresa deve levar em consideração não apenas como os clientes reagirão à garantia do prazo de entrega, mas também se ela tem capacidade adequada para cumprir o compromisso. Um curto prazo de entrega pode trazer tantos benefícios quanto custos. Pode aumentar a demanda do cliente, mas pode exigir um nível de capacidade mais alto.

As embalagens de papelão ondulado são as mais utilizadas no mundo, por apresentarem baixo custo, serem recicláveis e aperfeiçoarem o uso do espaço. Além disso, segundo a Associação Brasileira de Papelão Ondulado (ABPO), é considerado um termômetro da economia, uma vez que o aumento de sua produção indica um aquecimento nas vendas do varejo. No Brasil, segundo dados do IBGE para o ano de 2014, as indústrias de embalagens movimentaram R\$ 55,1 bilhões, um aumento de aproximadamente 6,17% em relação ao ano anterior. Deste montante, R\$ 10,2 bilhões são referentes a indústria de embalagens de papelão ondulado, o que mostra a força deste setor na economia. Como consequência, as Indústrias de Embalagens de Papelão Ondulado (IEPO) estão imersas em um ambiente moderno altamente competitivo e globalizado e necessitam cada vez mais de habilidades de organização e estratégia para atingirem o sucesso (FERREIRA, 2018).

O sucesso deste segmento, conforme afirma Pegels (1967), só pode ser atingido com uma grande flexibilidade necessária para lidar com a demanda sempre crescente, a grande variedade dos pedidos e o processo produtivo composto por vários estágios, para o qual é essencial uma programação da produção eficiente, resultante de toda manipulação inteligente de informações que leve a uma tomada de decisão acertada em relação a atribuição eficiente de tarefas, satisfazendo as restrições e minimizando os custos. Esta eficiência no setor produtivo das IEPO vem sendo perseguida desde a década de 60, quando surgiram os primeiros trabalhos voltados para processos específicos deste segmento.

Os trabalhos da área de pesquisa operacional relacionados ao processo produtivo em uma IEPO podem ser divididos basicamente em três tipos: os relacionados a formação, ao sequenciamento e a produção dos boletins. A maioria dos trabalhos analisados por Rodriguez (2009) abordou o problema da formação dos boletins, que consiste na programação de corte no corrugador (principal máquina do setor produtivo das IEPO que produz chapas de papelão ondulado a partir de bobinas de papel) com o objetivo de minimizar a perda lateral (*Trim Loss*), que surge da diferença entre a largura da placa e os padrões de corte escolhidos.

Este trabalho objetivou, de forma geral, identificar os possíveis fatores que interferem no fenômeno mecânico de desgaste prematuro de rolamentos de rolos cônicos (visto na Figura 1, página 15), utilizados em cilindros corrugadores na produção de papelão ondulado. Também visou identificar os parâmetros que possam auxiliar na decisão da vida útil do rolamento, aplicando o método da análise de *Weibul*

para equacionar e delinear o tempo de vida útil do rolamento rolos cônicos utilizados em cilindros corrugadores. Por fim, utilizou-se de ferramentas de gestão de qualidade para fomentar decisões sobre a substituição dos rolamentos especificados, por intermédio de procedimentos técnicos que identifiquem a vida útil do objeto em estudo. A ferramenta em questão escolhida foi a 5W2H.

Análise *Weibull* é uma metodologia utilizada para realizar a análise de dados da vida. Os dados da vida são o resultado de medições da vida de um produto ou equipamento a ser analisado. A análise *Weibull* é um método eficaz para determinar as características e tendências de confiabilidade de uma população usando um tamanho de amostra relativamente pequeno de dados de campo ou de laboratório. Dependendo do produto ou da indústria, os dados da vida útil do produto são calculados em horas, quilômetros, número de ciclos ou outras métricas usadas para estabelecer uma medida da função bem-sucedida de um produto.

O método foi nomeado pelo Sr. *Waloddi Weibull*, que em 1937 inventou a distribuição *Weibull*. Ele apresentou um artigo sobre o assunto em 1951. A reação inicial ao artigo inicialmente variava de incerteza a rejeição total. No entanto, outros no campo começaram a utilizar e melhorar o método, resultando na sua implementação pela força aérea americana nos anos 1970, e mais tarde pela indústria automotiva. Na indústria atual, a Análise *Weibull* é o principal método para avaliar dados de vida. O método a ser utilizado tem por sua natureza da relação entre duas variáveis pode assumir inúmeras formas, abrangendo desde funções matemáticas simples até funções matemáticas extremamente complicadas (LEVINE; STEPHAN; SZABAT, 2019).

Atualmente, a maioria das empresas monitora os custos de garantia e as taxas de falha do produto. O objetivo é reduzir os custos operacionais e a possível perda de valor da marca, por atraso e falta de qualidade. Além disso, as informações coletadas usando uma Análise *Weibull* permitem que o fabricante planeje todos os custos conhecidos ou defina os termos adequados a manutenção preventiva. A análise *Weibull* é um método eficaz para determinar as características e tendências de confiabilidade de uma produção usando um tamanho de amostra relativamente pequeno de dados de campo ou de laboratório.

A Análise *Weibull* é uma ferramenta valiosa e relativamente fácil de aplicar que pode ser utilizada por engenheiros ou analistas de confiabilidade. A distribuição do conjunto de dados pode ser usada para avaliar a confiabilidade do produto, determinar a vida média, a probabilidade de falha em um momento específico e estimar as taxas gerais de falha.

METODOLOGIA

Tipo de Trabalho

Com base no procedimento técnico adotado, trata-se de um estudo de caso, cuja proposta residiu adquirir o conhecimento sobre a vida útil do rolamento de rolos cônicos utilizado nos rolos corrugadores. Com base na obtenção de informações é de

abordagem algébrica, uma vez que se propõe equacionar os dados e intensificar ações para o atendimento de requisitos pré-estabelecidos pelo setor de confiabilidade e manutenção, são exigidos para o desempenho que suprem as necessidades específicas da operação, que caracteriza a desempenho do rolo corrugador em estudo. As ferramentas de gestão da qualidade facilitaram o equacionamento dos dados e intensificarão ações para o atendimento de requisitos pré-estabelecidos pelo setor de confiabilidade e manutenção, atentos ao desempenho que suprem as necessidades específicas da operação, que caracteriza a performance do rolo corrugador em estudo.

Levantamento Bibliográfico

Utilizou-se os procedimentos de uma revisão bibliográfica narrativa para o levantamento do material científico deste trabalho de graduação. A escolha seletiva do material chegou aos principais estudos primários para que a situação problema delineada possa ser elucidada. A revisão bibliográfica recupera, seleciona e avalia os resultados dos estudos relevantes e permite considerar a evidência científica de maior grandeza na tomada de decisão (MARCONI; LAKATOS, 2018).

As palavras-chave para o levantamento das informações bibliográficas foram: rolamentos; cilindros corrugadores; método de *Weibull*; regressão linear; *5W2H*. A base de dados indexada disponibilizada na internet para a busca do material bibliográfico foi o Google Acadêmico, um sistema de buscas refinadas do Google que oferece ferramentas de buscas de diversas fontes acadêmico-científicas. Artigos vistos em outras bases, como o *SCIELO* e o Portal de Periódicos da CAPES/MEC, já estavam contemplados no Google Acadêmico.

Após o levantamento do material bibliográfico, tornou-se necessário estabelecer critérios de inclusão e exclusão destes para o processo de desenvolvimento textual. Os critérios de inclusão permitiram a participação de estudos originais e de revisão, artigos escritos na língua portuguesa que pudessem colaborar na resolução da questão norteadora. Os critérios de exclusão consideraram os objetivos específicos da pesquisa e relações com os títulos e resumos dos trabalhos obtidos.

Estudo de Caso

A pesquisa teve seu início com a formulação da seguinte questão norteadora: a estimativa da vida útil do rolamento impacta na performance produtiva do equipamento e, sobretudo, no processo produtivo do papelão ondulado como um todo? Todo o estudo foi delineado baseando-se nos trabalhos de Rossi e Antunes Neto (2020) e Leiri et al. (2021), orientados pelo presente orientador deste projeto, bem como por Miguel (2017).

Empresa

O estudo de caso apresentado transcorre em uma empresa de transformação de papel em embalagens de papelão ondulado. A mesma tem como missão prover o cliente com soluções em embalagens de papelão ondulado, assegurando, por meio de tecnologia atualizada e colaboradores preparados, produtos de qualidade e excelência em serviços, visando um relacionamento confiável e duradouro. Ressalta-se que a empresa tem por objetivo desenvolver continuamente a melhoria de seus processos, produtos e serviços, visando a satisfação total dos clientes, o que possibilitou a obtenção dos dados tratados nesta pesquisa. Para atingir esse objetivo, assume o compromisso de fortalecer as parcerias com clientes e fornecedores, promover a melhoria contínua em seu sistema de gestão e aumentar sempre a capacitação tecnológica. Da mesma forma, promove permanentemente o desenvolvimento dos colaboradores e as relações entre os clientes e fornecedores internos.

Estrutura do estudo de caso

O estudo de caso considerou as abordagens de sobre a condução da investigação (nível de desenvolver parâmetros de confiabilidade mecânica). Quatro etapas foram estruturadas:

Definição da estrutura conceitual teórica

Nesta etapa houve a definição do referencial conceitual teórico da pesquisa, com objetivo de mapear dados primários e secundários sobre o assunto, para que se pudesse compreender a situação problema. O constructo teórico permitiu identificar lacunas onde a pesquisa pôde ser justificada (em termos de relevância), bem como possibilitou extrair os constructos (elementos extraídos da literatura que representam um conceito a ser verificado). O estudo de Rodriguez (2009) foi fundamental para a concepção do processo investigativo.

Planejamento do caso

A situação problema delimitada emergiu em conformidade com observações *in loco* da rotina de acompanhamento do Setor de Manutenção e Confiabilidade (SEMEC). A necessidade de resolução do problema surgiu a partir do momento que as anomalias geraram indisponibilidade operacional e conseqüente impacto no processo produtivo. Com isso, intensificou-se a busca para a resolução do problema, com a etapa inicial sendo o planejamento estratégico com aplicação da ferramenta 5W2H para posterior teste de hipótese e regressão linear, por meio do método de Weibull.

Coleta dos dados e análise estratégica

As coletas ocorreram entre os meses de março e outubro de 2022, com efetiva contribuição dos departamentos envolvidos, possibilitando a análise dos dados obtidos no cabeçote “B” da onduladeira Huchida. A partir da análise 5W2H foi possível enumerar valores e gerar *inputs* para o método de *Weibull*.

O 5W2H (*What-Why-Where-When-Who-How-How*) é um modelo aplicado para guiar a construção de um plano de ação, ou seja, uma ferramenta para simplificar o planejamento de atividades. Além disso, proporciona mais objetividade para a execução de uma ação (SILVA, 2022).

O método de *Weibull* permite estimar a confiabilidade que é apresentada através da probabilidade de sobrevivência até um tempo t de interesse. A probabilidade é determinada modelando os tempos até a falha do sistema em análise. Com a distribuição de probabilidade de falha que se encaixa aos tempos pode-se estimar a probabilidade de que o sistema não falhe em qualquer tempo t , tornando a análise do tempo até a falha um fator importante para confiabilidade (BOEIRA, 2022) A função *Weibull* pode ser predita por intermédio do *software Excel do Microsoft 365*, versão essa utilizada pelos autores do trabalho.

Geração do relatório de pesquisa

O relatório de pesquisa considerou as anomalias detectadas ao longo do regime operacional do equipamento, sendo apresentado na forma de planilhas e gráficos gerados com o auxílio do *Microsoft Excel* por meio de habilitação da função *Solver*, que permite elaborar e equacionar regressões lineares, testes de hipóteses, probabilidades, dentre outras funcionalidades.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processo produtivo das Indústrias de embalagens de papel ondulado pode ser dividido em três etapas. A **primeira etapa** ocorre na planta de papel, e consiste na produção das bobinas de papel de diferentes gramaturas, que tem como matéria-prima as aparas (todos os tipos de papéis usados), e a pasta quimiomecânica (pasta de materiais ligno-celulosicos prévia e levemente tratados com reagentes químicos, obtida por desfibramento a pressão atmosférica). As bobinas produzidas vão para o setor de armazenagem para posterior logística das bobinas.

A **segunda etapa** ocorre nos cilindros corrugador aonde, de acordo com as especificações técnicas, as bobinas produzidas na primeira etapa são inseridas aos pares, em estruturas denominadas porta-bobinas. Utilizando as bobinas nele instaladas, o corrugador produz chapas retangulares de papelão ondulado. Posteriormente, estas chapas são cortadas em retângulos menores, chamados *blanks*, que constituem a base para a produção de uma caixa de papelão.

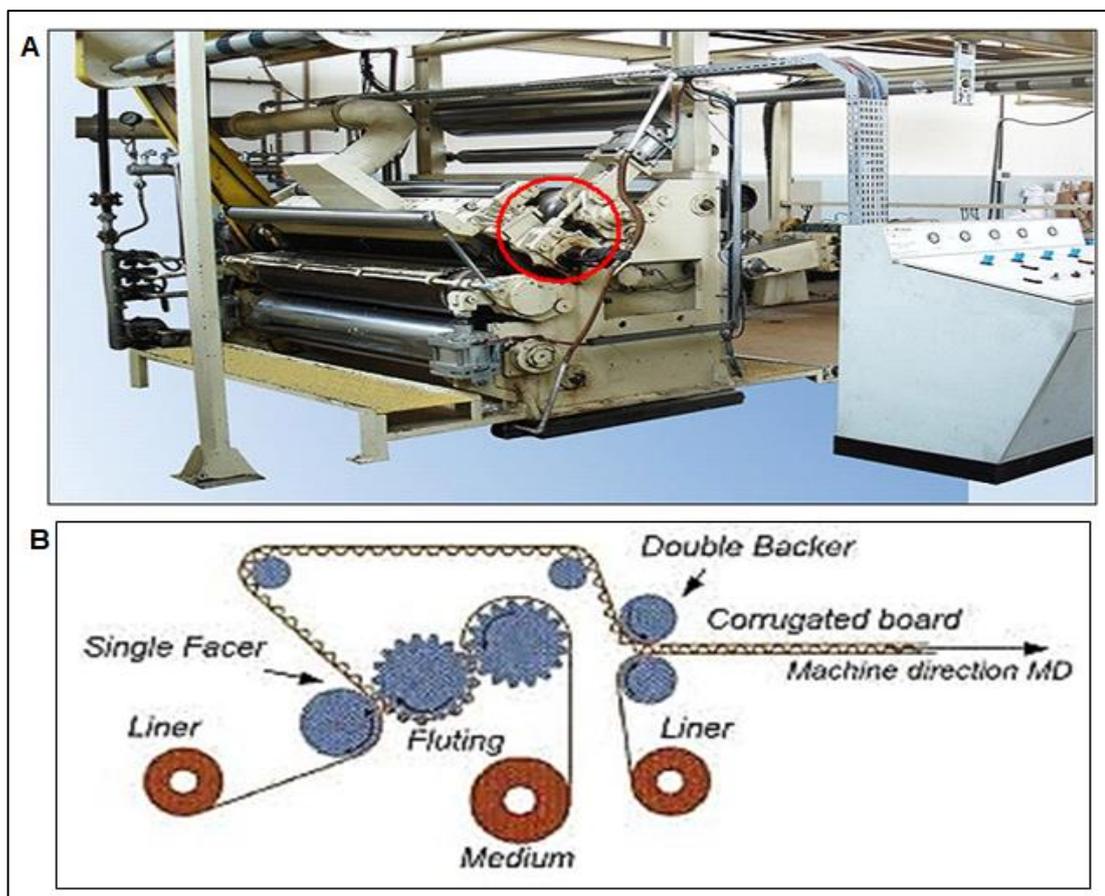
Finalmente, na **terceira etapa**, que ocorre na impressora flebográfica, são feitos os recortes e impressão dos *blanks*. Alguns tipos de caixas, devido a sua

especificação, podem passar por outras etapas, como é o caso de caixas grampeadas ou com colagem especial. Etapas estas realizadas nas máquinas grampeadeiras e coladeiras.

O foco deste trabalho está na segunda etapa do processo produtivo de papelão ondulado, mais especificamente, no sequenciamento da produção, de união dos papeis denominados forro, miolo e capa.

A **Figura 1** apresenta o equipamento em estudo (onduladeira Huchida), o qual é capaz de realizar o processo de transformação de papel *kraft* (virgem) ou reciclado (abrasivo) em chapas de papelão. Circundado, em vermelho a indicação do rolamento que sofre as avarias e o desgaste que necessita ser avaliado (Figura 1-A). A Figura 1-B o fluxo das folhas de papel no equipamento:

Figura 1. Cilindro corrugador (A) e o fluxo da folha de papel (B).



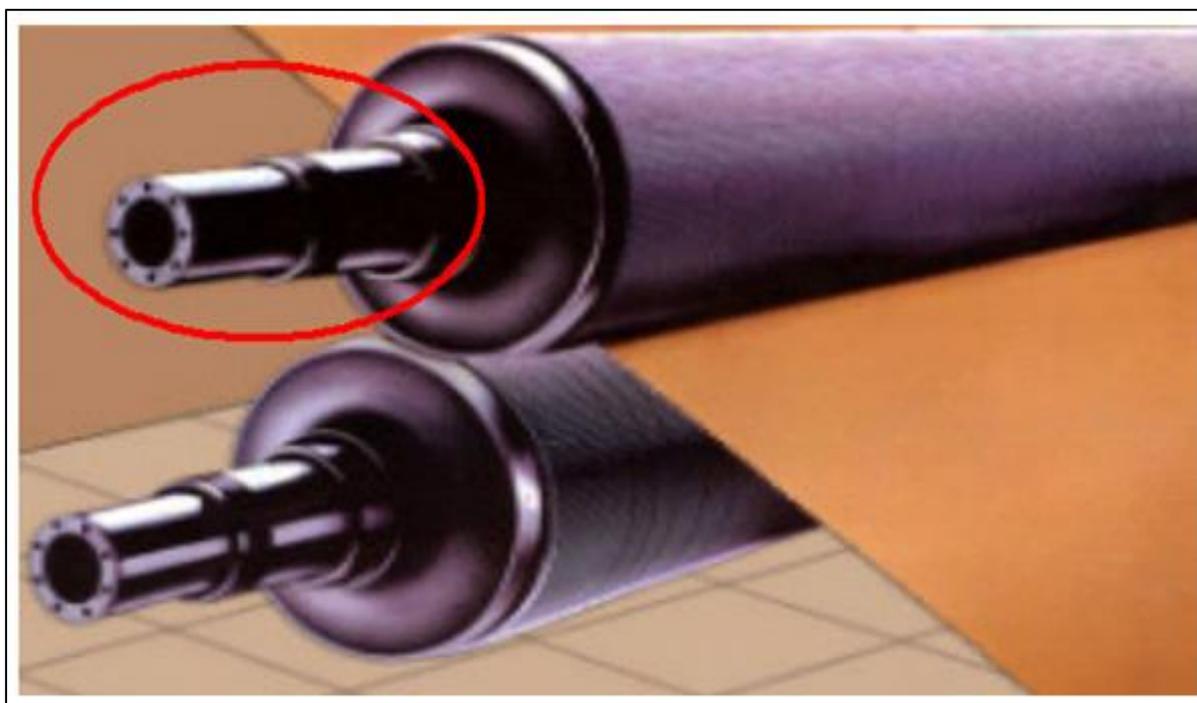
Fonte: adaptado de mfrancar.com.br

Onde: **Liner**= Cilindro frio para manter folha de papel com tensão inicial; **Single Facer**= Primeiro cilindro de onda "C" aquecido; **Fluting**= Conjunto de cilindros para onda "B" aquecido; **Medium**= Cilindro liso em formato inclinado para extremidades; **Double Backer**= Cilindro liso aquecido para facilitar a colagem do forro e da capa na folha ondulada.

Na Revolução Industrial, o rolamento teve a utilização acentuada, e, com o surgimento da indústria automotiva, os rolamentos tiveram inúmeras alterações até os dias atuais (MURBACH JUNIOR, 2016). No caso em estudo, especificamente há a necessidade de se efetuar o reparo do rolamento de rolos cônicos utilizado no cilindro corrugador, visto na Figura 1-A. Isso ocorre por diversos agravantes, tais como: falta de lubrificação, temperatura excessiva, carga axial e radial elevadas. Porém, uma intervenção sem base técnica pode impactar negativamente em toda a cadeia produtiva, que neste caso trata-se do papelão ondulado em formato de chapas. Por exemplo, para se efetuar a manutenção corretiva do equipamento, há um desperdício de troca térmica em virtude de um aumento de pressão na linha de vapor, essa utilizada para aumentar a eficiência de colagem entre capa e miolo, forro. Desta forma, é crucial aplicar métodos de estimativa de vida útil para rolamentos empregados neste tipo de equipamento, para que se evite uma diminuição na confiabilidade do equipamento, ou seja, diminuição na OEE (*Overall Equipment Effectiveness*). A Figura 1-B ilustra a sequência dos eventos de passagem do papel, ressaltando que a maior possibilidade de avaria ocorre em *fluting*, onde a incidência da força tem o sentido da gravidade e o sistema de mancalização é dimensionado para cargas em sentido oposto a esta grandeza física.

A **Figura 2** amplifica a ponta do eixo do cilindro corrugador, visto circundado na Figura 1, ponto crucial de ocorrência das avarias decorrentes dos agravantes trazidos no parágrafo acima:

Figura 2 - Detalhe do cilindro corrugador.

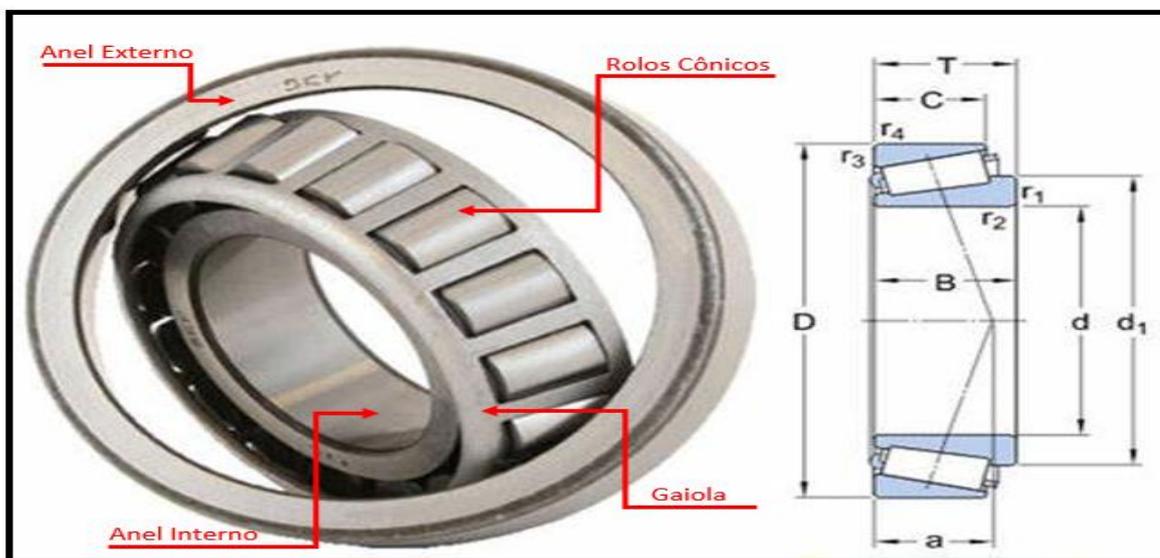


Fonte: adaptado de mfrancar.com.br

A **Figura 2** mostra que os cilindros corrugadores são confeccionados em material metálico, em sua maioria revestido de tungstênio para aumentar a resistência a abrasividade do papel. Tem característica geométrica interna em formato de tubo, permitindo, assim, a passagem de vapor, item esse fundamental no processo de ondulação de chapas. O furo central do eixo recebe vapor saturado para acelerar o processo de colagem. A ilustração acima demonstra uma das principais partes envolvida neste estudo de caso, que é o orifício de passagem de vapor, um fator intrínseco ao processo de produção, mas também um agravante recorrente neste tipo de equipamento.

Fica evidente que, ao partir do princípio de que um sistema é uma combinação de componentes que atua conjuntamente para a obtenção de um objetivo, historicamente nota-se a existência de sistemas de produção (AZEVEDO, 2013). Tecnicamente, um rolamento é um componente que permite movimento rotativo (controlado ou não) entre dois ou mais elementos. Serve principalmente para reduzir o atrito ou fricção de deslizamento entre as superfícies de contato (eixos, polias ou mancais de rolamento, por exemplo). Sua fabricação é normatizada, e segue altos padrões de qualidade, com medidas controladas e materiais de alta resistência, como, por exemplo, aço combinado com cromo ou aço inox. A **Figura 3** apresenta a estrutura de um rolamento.

Figura 3. Estrutura do rolamento.



Fonte: adaptado de site www.skf.com.br

Onde: **B** = Comprimento Total em unidade de medida métrica padrão; **C** = Comprimento Anel Externo em unidade de medida métrica padrão; **T** = Comprimento Total entre Anel Externo e Interno em unidade de medida métrica padrão; **r3, r4, r2, r1** = Indicação de raio em unidade de medida métrica padrão; **D** = Diâmetro Externo em unidade de medida métrica padrão; **d** = Diâmetro Interno em unidade de medida métrica padrão; **d₁** = Diâmetro encosto do rolos em unidade de medida métrica padrão; **a** = Indicação ponto dissipação e atenuação das forças no sentido radial.

Pode-se considerar pela Figura 3 que a pressão na área de contato rolante e a sobrerolagem cíclica cria fadiga nos anéis quando o rolamento está em funcionamento. Para lidar com essa fadiga, os anéis feitos de aço devem ser temperados. Os elementos rolantes (esferas ou rolos) transferem a carga entre os anéis interno e externo. Normalmente, o mesmo aço é usado para os elementos rolantes, as arruelas e os anéis dos rolamentos. Quando necessário, os elementos rolantes podem ser feitos de material cerâmico. Rolamentos com elementos rolantes de cerâmica são considerados rolamentos híbridos (anéis feitos de aço para rolamentos e elementos rolantes que isolam eletricamente os rolamentos) e estão se tornando cada vez mais comuns. A gaiola tem como função: separar os elementos rolantes para reduzir o calor de atrito gerado no rolamento; manter os elementos rolantes distribuídos uniformemente para otimizar a distribuição de carga; guiar os elementos rolantes na zona não carregada do rolamento; reter os elementos rolantes dos rolamentos separáveis quando um anel é removido durante a montagem ou desmontagem. A vedação integral pode aumentar significativamente a vida útil do rolamento porque mantém o lubrificante dentro do rolamento e os contaminantes fora dele.

A maior parte das empresas enfrenta ou enfrentará problemas com a confiabilidade de seus produtos, frequentemente causados por um ou mais dos seguintes motivos: um modo de falha não previsto, condições operacionais piores do que as previstas, mudanças inesperadas na qualidade da matéria-prima ou alterações de projeto mal validadas. A adequada monitoração das falhas em garantia pode identificar estes problemas antecipadamente, permitindo a redução dos custos tangíveis e intangíveis da baixa confiabilidade (MEEKER; HAMADA, 2015).

Ao medir a confiabilidade dos produtos em campo, o fabricante pode obter importantes informações para a melhoria do projeto e processo de fabricação, prever recursos para a assistência técnica, dimensionar prazos de garantia e detectar precocemente falhas relacionadas à confiabilidade do produto. Tipicamente as informações de falhas em garantia e volumes de venda já são registradas nestas empresas para fins de controle de custos da área de assistência técnica, controle e planejamento de produção e previsão de faturamento. Com procedimentos simples de refinamento destes dados é possível sua aplicação também no estudo de confiabilidade, gerando um mínimo de custos adicionais (WU; MEEKER, 2012).

Tendo-se como problemática de estudo compreender se a estimativa da vida útil do rolamento impacta na performance produtiva do equipamento e, sobretudo, no processo produtivo do papelão ondulado como um todo, partiu-se para a aplicação da ferramenta 5W2H para identificação da causa raiz, conforme visto na **Figura 4**:

Figura 4. Fluxograma 5W2H aplicado na resolução do problema de estudo.

	PLANO DE AÇÃO:	Identificar Anomalia Rolamentos							
	DATA PREVISÃO:	de 03/jan a 01/mar		DATA REALIZADA:	de 6/Ago a 10/Dez (andamento)				
	RESPONSÁVEL:	Engenharia de Manutenção							
	OBJETIVO:	Identificar possível causa raízes de anomalia em rolamentos dos rolos cônicos (Onduladeira)							
5W					2H		Status		
O que? (What?)	Porque? (Why?)	Onde? (Where?)		Quem? (Who?)	Quando ? (When?)	Como? (How?)		Quanto custa (How Much)	
Avaliar Rolamento foi inspecionada antes da montagem	Necessário otimizar produtividade, facilitar registros e eliminar retrabalhos	Engenharia de Qualidade		Analista	03/ago	Medição inspeção visual		Estimado no inicio	Feito
Avaliar temperatura inicial do cilindro corrugador	Identificar o que faltou ser comunicado e tirar dúvidas para prosseguir	Cabeçote OND-B Maquina Uchida		Analista / Gestor	até 20 Agosto	Utilizar termômetro na linha principal de vapor		Estimado no inicio	Feito
O fabricante de rolamento atende os requisitos de qualidade	Identificar a solução que atende todas as necessidades de gestão	Solicitar documentação via Engenharia da Qualidade comprobatória da validação em seu processo de manufatura		Analista / Gestor	até 10 Agosto	Databook, certificação ISO		Estimado no inicio	Feito
A montagem segue recomendações do fabricante	Ter clareza na comunicação e facilitar o acesso as informações	Engenharia de Manutenção		Engenheiro Mecânico	até 10 setembro	Criar Memorial descritivo para todos os Manutentores		Estimado no inicio	Feito
O sistema de monitoramento da anomalia é compatível	Avaliar como as melhorias na interação após solução implementada	Engenharia de Confiabilidade		Engenheiro Mecânico	ate 25 setembro	Aplicar metodologia para identificar causa raiz e validação da probabilidade de quebra-falha		Se preciso, aditivos de até 30% valor inicial.	Fazendo

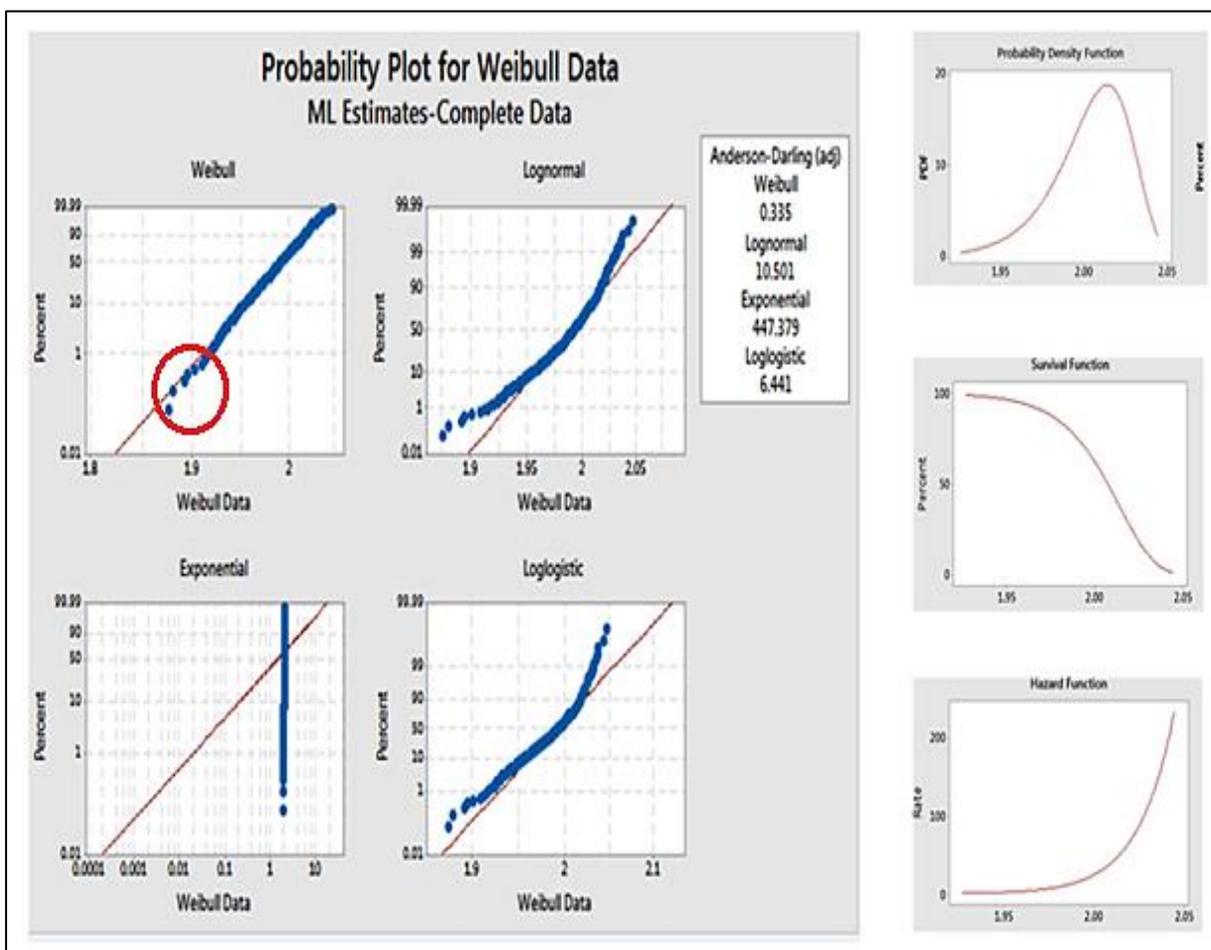
Fonte: elaborado pelos autores.

A **Figura 4** possibilita identificar e interpretar as possíveis causas iniciais motivadoras deste trabalho. Na fase de planejamento do caso, cinco causas foram consideradas as mais prováveis para o desencadeamento das avarias: validação dimensional conforme catálogo do fornecedor (avaliação antes da montagem); análise de temperatura inicial do cilindro corrugador; certificação de validação de origem de material (requisitos de qualidade fornecidos pelo fabricante); montagem do rolamento segundo as recomendações determinadas pelo fabricante; interação homem-máquina (IHM) desempenhada por *software* específico (coleta de picos de vibrações e aquecimentos). Evidencia-se que todas as causas foram analisadas por setores especializados e profissionais responsáveis pela validação de cada requisito, utilizando-se instrumentos apropriados e documentações técnicas de rigor normativo. Os prazos foram estabelecidos em consenso com os setores envolvidos, de forma que 80% das tarefas já obtiveram respostas adequadas que permitiram explorar o método de *Weibull*.

O procedimento utilizado para compreender a situação-problema foi o equacionamento do método de *Weibull*. Trata-se de uma distribuição que é evidenciada principalmente em estudos de confiabilidade e na análise de dados de sobrevivência no contexto da modelagem de funções de risco. É um método de regressão numérica utilizado de maneira muito vasta para encontrar probabilidade, seja para anomalia ou tendência expectativas futuras. Consiste em uma coleta de dados inicial oriunda do *software* instalado no IHM (especifica o registro do momento que a anomalia surge); na sequência, tais dados são transferidos e tratados no *software Excel do Microsoft 365*, de forma que os mesmos ficam enumerados do valor menor para o maior, coletados em um intervalo mensal.

A **Figura 5** apresenta comparativos entre métodos onde se pode observar que, para o presente estudo, a aplicação do método de *Weibull* é a melhor estratégia para direcionamento e resolutividade da questão norteadora já mencionada:

Figura 6. Análise Weibull.



Fonte: Adaptado site <https://www.fm2s.com.br/analise-weibull/>

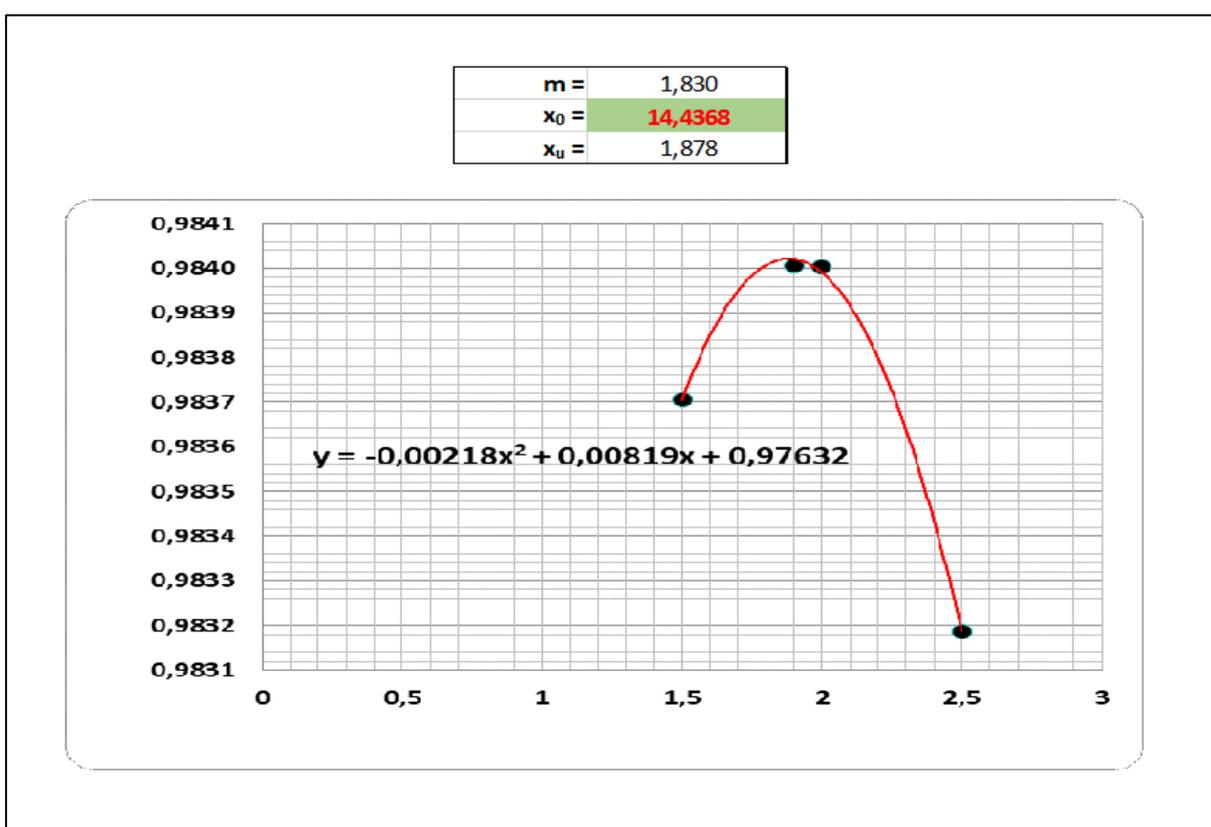
O ponto de intersecção entre as coordenadas x e y indica o valor b (que é a somatória do valor y com o valor x dividido por 2), conforme visto na Figura 5. Quando o valor b é representado em um gráfico, fica evidente porque é denominado declive. O parâmetro de forma é um dos mais amplamente examinados, porque ajuda a indicar os tipos de falhas que ocorrem na base na inclinação ou no valor b. Veja que na análise *Weibull* há um descolamento dos pontos entre o ponto 1 y e próximo a 1,9 x, circundado em vermelho para uma melhor compreensão didática. O valor circundado demonstra que há um descolamento da linha de probabilidade e neste momento a acurácia do método torna-se inválida.

- Se o valor de $b < 1$, as falhas provavelmente diminuirão com o tempo. Isso pode indicar um grande número de falhas infantis ou precoces; tende a ser menor ao longo da vida útil do item em avaliação;

- Um valor de $b = 1$ apresenta uma taxa de falha constante que é indicativa da vida útil ou de falhas aleatórias. Pode ocasionar paradas do equipamento sem previa anomalia identificada.
- Quando o valor de $b > 1$, a taxa de falha geralmente aumentará com o tempo. Isso pode ser uma indicação de problemas prematuros de desgaste, falta de manutenção adequada ou fim da vida útil do produto.

A **Figura 6** apresenta os dados obtidos no presente estudo:

Figura 6. Aplicação do método de Weibull na situação problema do estudo.



Fonte: obtido pelos autores.

Onde: m = modulo; x_0 = vida útil (em dias); x_u = valor da posição (correspondente ao valor b trazido na Figura 5).

Com base no resultado da **Figura 6**, pode-se afirmar que a metodologia é eficaz e demonstra que a anomalia (denominada “quebra-falha”) tende a ocorrer em um intervalo de aproximadamente 14 dias (x_0).

Para a análise dos dados coletados podem ser utilizados programas gratuitos de análise estatística, mas esses têm utilização complexa e pouco difundida. Programas específicos para análise de confiabilidade são caros e incorporam recursos desnecessários ao objetivo proposto. A execução dos algoritmos de análise em planilha eletrônica (*software Excel do Microsoft 365*) não gera custos adicionais a empresa se a mesma já utiliza este tipo de programa, popularmente conhecido, contribuindo para a redução de custo do estudo, sem prejuízo ao que tange a custos de implementação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Atualmente, a maioria das empresas monitora os custos de garantia e as taxas de falha do produto. O objetivo é reduzir os custos operacionais e a possível perda de valor da marca, por atraso e falta de qualidade. Além disso, as informações coletadas usando uma Análise *Weibull* permitem que o fabricante planeje todos os custos conhecidos ou defina os termos adequados a manutenção preventiva. A análise *Weibull* é um método eficaz para determinar as características e tendências de confiabilidade de uma produção usando um tamanho de amostra relativamente pequeno de dados de campo ou de laboratório.

Os dados de vida são o resultado de medições da vida de um produto ou equipamento ou parte do mesmo. A Análise *Weibull* é uma ferramenta valiosa e relativamente fácil de aplicar que pode ser utilizada por engenheiros ou analistas de confiabilidade. A distribuição do conjunto de dados pode ser usada para avaliar a confiabilidade do produto, determinar a vida média, a probabilidade de falha em um momento específico e estimar as taxas gerais de falha.

As informações de falhas em campo são tipicamente imprecisas. Não há informações exatas das datas em que o produto começou a ser utilizado e em que apresentou a falha e nem de sua taxa de utilização, o que dificulta estimar o tempo de operação até a falha, informação básica para os estudos usuais de confiabilidade. As incertezas existentes nos dados motivam a análise da confiabilidade a partir de informações mais simples de ser coletadas e analisadas, como as vendas e falhas mês a mês, sem a necessidade de rastrear a data de venda de cada produto que falhou (RAI; SINGH, 2003).

Os resultados obtidos neste estudo possibilitaram comprovar que o método de *Weibull* é de fundamental relevância para identificar a probabilidade da falha, porém deve-se ter como premissa que o domínio de ferramentas de melhoria contínua do processo, no caso deste estudo foi a 5W2H, foi o fator preponderante para se estabelecer as causas raízes e, a partir destas, ter condições de direcionamento para o uso pertinente de tecnologias de avaliação do processo produtivo como um todo.

REFERÊNCIAS

AZEVEDO, M. M.; SOUSA, J. S. S. Otimização de ciclo para aumento de produtividade em máquina de retífica interna de rolamentos. **VII Conferência CONNEPI (Congresso Norte-Nordeste de Pesquisa e Inovação)**. ISBN 978-8562830-10-5 Anais. Palmas, TO, 2012.

BOEIRA, F. S. Estudo e análise de falhas em pás carregadeiras baseado na manutenção centrada em confiabilidade. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso). 2022. 21 f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Escola de Engenharia. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2022.

FERREIRA, M. **Problemas de Programação de Produção em Indústrias de Embalagens de Papelão Ondulado**. Tese (Doutorado em Matemática). 2018, 108 f. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, São José do Rio Preto, São Paulo, 2018.

IEIRI, L. F.; ROMÃO JUNIOR, J. M.; BARRETO, E. A.; ANTUNES NETO, J. M. F. Aplicação de ferramentas de melhoria continua da qualidade na análise de papelão ondulado: estudo de caso. **Prospectus**, v. 2, n. 2, p. 224-243, 2020.

LEVINE, D.M, STEPHAN, D.F, SZABAT K.A; **Estatística Teoria e Aplicações**, LTC, 7 ED. Rio de Janeiro, 2019, 475 f.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de Pesquisa**. 8ª edição. São Paulo: Atlas, 2018.

MEEKER, W. Q; HAMADA, M. Statistical tools for the rapid development & evaluation of high reliability products. **IEEE Transactions on Reliability**, v.44, n.2, p.187-198, 1995.

MIGUEL, P. A. C. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. **Revista Produção**, v. 17, n. 1, p. 216-229, 2007.

MURBACH JUNIOR, E. **Avaliação de ciclo de vida em processo de fabricação de rolamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). 2016, 82 f. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Bauru, São Paulo, 2016.

PEGELS, C. A comparison of scheduling models for corrugator production. **Journal of Industrial Engineering**, v. 18, n. 8, p. 466, 1967.

RAI, S.; SINGH, N. Hazard rate estimation from incomplete and unclean warranty data. **Reliability Engineering and System Safety**, v.81, p.79-92, 2003.

RODRÍGUEZ, T. F. T. Una combinación de un algoritmo voraz con algoritmos genéticos para optimizar la producción de cartón ondulado. **Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa**, n. 8, p. 71–86, 2009.

ROSSI, N. P.; ANTUNES NETO, J. M. F. Análise do descarte de resíduos sólidos com tintas em uma empresa especializada em embalagens de papelão ondulado: estudo de caso. **Prospectus: Gestão e Tecnologia**, v. 2, n. 1, p. 88-121, 2020.

SILVA, E. S. **Aplicação de ferramentas da qualidade para melhoria de processos: uma revisão sistemática da literatura**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso). 2022. 84 f. Universidade Federal de Alagoas – UFAL – Engenharia de Produção. Delmiro Gouveia, Alagoas, 2022.

WU, H.; MEEKER, W. Q. Early detection of reliability problems using information from warranty databases. **Technometrics**, v.44, p.120-133, 2002.

Os autores declararam não haver qualquer potencial conflito de interesses referente a este artigo.