ESTRATÉGIA EM PROCESSO INDUSTRIAL DE INSERÇÃO DE ANEL ELÁSTICO: APLICAÇÃO E ANÁLISE NO SETOR AUTOMOTIVO

Rodrigo da Silva Mengue, r.mengue@edu.pucrs.br
Sérgio Boscato Garcia

Resumo. *O mercado brasileiro automotivo vem apresentando uma crescente demanda por novas tecnologias e um alto volume de peças produzidas. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo implementar uma operação de manufatura de componente da coluna de direção elétrica (CEPS) em uma máquina já existente guiada por servo prensa. Com isso, o processo se torna mais robusto e seguro, evitando o envio de peças não conformes para o cliente. Durante o estudo, foram executadas diversas alterações mecânicas na máquina e foi desenvolvido um novo conceito de estratégia de inserção ao processo. Por fim, foram realizados testes de validação para determinar a capabilidade da operação e garantir o correto funcionamento durante toda sua vida fabril.Por fim, foi determinado estatisticamente um índice aceitável de capabilidade do processo.*

Palavras-chave*: Direção elétrica, inserção, manufatura, servoprensa*

1. INTRODUÇÃO

Com as revoluções industriais e os avanços no mundo da manufatura, processos como o de inserção vêm crescendo cada vez mais nas grandes montadoras automotivas de todos os segmentos. Um processo de inserção consiste basicamente em fazer a inserção de um componente ou mais em outro e tem por finalidade uma montagem mecânica robusta e segura. Todos os anos de desenvolvimento e aprimoramento levaram a indústria a um elevado patamar de controle e, uma vez que o ramo automotivo apresenta necessidades de elevada segurança e confiabilidade, processos industriais de inserção são altamente aplicados e necessários.

No Brasil, o mercado automotivo vem crescendo com uma alta taxa. De acordo com a FUNDEP - Fundação de Apoio da UFMG (2024), o acréscimo de vendas de veículos entre os anos de 2023 e 2024 foi de 13,1%. Isso exige que os investimentos no ramo cresçam e, consequentemente, sejam justificados. A recente união entre dois dos maiores grupos de montadoras do mercado representou um grande impacto no acréscimo dessa procura. O grupo Stellantis, criado a partir da fusão do grupos FCA (*Fiat Chrysler Automobiles*) e PSA (*Peugeot-Citroën*), detêm a liderança de vendas do segmento *pick-up* compacta e está presente também com o *hatch* compacto no *ranking* dos mais vendidos (CNN Brasil, 2024).

O alto investimento de qualquer empresa de alta severidade tem como objetivo trazer um produto mais confiável e estável para os seus clientes. Dessa forma, os fornecedores devem estabelecer padrões de construção que respeitem normas de qualidade. A certificação do setor automotivo IATF 16949-2016 é um sistema de garantia desses padrões de construção dos fornecedores OEM *(Original Equipment Manufacturer)* ou de peças de reposição. É mencionado na norma que, o objetivo desta norma automotiva é criar um sistema de gestão da qualidade que promova a melhoria contínua, com foco na prevenção de defeitos e na diminuição da variação e desperdício na cadeia de suprimentos (IATF 16949-2016). Portanto, é evidente que os requisitos de qualidade estão cada vez mais rígidos no setor automotivo e as melhorias nos processos são contínuas.

Como todo processo fabril, o objetivo principal de empresas é ser o mais eficiente possível. O conceito de eficiência provém da ideia de fazer mais com menos. Dessa forma, o *Lean*

Manufacturing apresenta uma grande importância para qualquer processo fabril. A manufatura enxuta pode ser definida como a eliminação de resíduos em um sistema de produção que pode estar relacionado aos esforços humanos, inventário de tempo em vários estágios de produção (RAHMAN, 2013). A Toyota, pioneira desse sistema de produção, foi a primeira a implementá-lo em seu processo. A montadora percebeu que o modelo de produção em massa utilizado no século XIX apresentava diversas falhas e foi a responsável por difundir o que hoje é conhecido como modelo de manufatura enxuta.

Quando é observada a construção de máquinas de alto nível de controle e confiabilidade, é no mínimo questionável que também seja necessário ter um racional enxuto. Um processo produtivo do setor automotivo deve apresentar as melhores soluções para manter a qualidade sempre nos níveis máximos. Nesse âmbito, o desenvolvimento dos processos se difere com a rotina de manufatura de uma fábrica. O ambiente no qual as máquinas serão expostas deve funcionar sem falhas, desperdícios ou gastos elevados. O ambiente no qual máquinas automáticas são desenvolvidas requer um alto empenho e uma conduta metódica, pois ao debater-se sobre colunas de direção elétrica, trata-se de um produto totalmente ligado com a segurança do motorista e de seus passageiros. De acordo com Röpke (1996), os sistemas de qualidade proporcionam os instrumentos necessários para assegurar que os requisitos e atividades sejam acompanhados e verificados de uma maneira planejada, sistemática e documentada. Assim, dimensionar um sistema de qualidade não significa aumentar ou reduzir a qualidade dos serviços ou produtos, mas sim, aumentar a certeza de que os requisitos e atividades especificados sejam cumpridos.

O objetivo deste estudo foi aplicar as ferramentas de controle existentes em servo prensas e, além disso, evidenciar os benefícios que as mesmas agregam para a automação. Serão abordados fatores de uma etapa de montagem da coluna de direção elétrica apresentando estratégias de inserção que garantem a correta execução do processo. A inserção de dois aneis elásticos metálicos em um acoplamento.

2. A DIREÇÃO ASSISTIDA E SEUS COMPONENTES MECÂNICOS E ELETRÔNICOS

De acordo com Gillespie (1961), o sistema de direção dos veículos automotores possui grande importância no comportamento estático e dinâmico. A coluna de direção assistida é um sistema de condução que garante o controle e a posição das rodas do veículo. Tal sistema representa um auxílio para o motorista ao efetuar o movimento de esterçamento do volante, podendo ele ser proveniente de um motor elétrico ou um sistema hidráulico. Atualmente, devido a todas as frentes, movimentos e demandas para promover a sustentabilidade aplicada a veículos, o sistema hidráulico foi substituído pelo elétrico. Apesar de ambos os sistemas apresentarem o mesmo objetivo, a coluna de direção elétrica é uma evolução da aplicação de sistemas hidráulicos e trouxe mais robustez e uma diminuição expressiva da necessidade de manutenção.

Um sistema de direção hidráulica funciona a partir da movimentação de um fluido por uma bomba hidráulica contida em um sistema fechado. A pressão exercida pelo fluido sobre a barra de direção compele os setores de direção para que as rodas possam se movimentar de acordo com o direcionamento desejado ao veículo. Apesar do fluido não precisar de trocas rotineiras, o sistema de mangueiras no qual ele permanece apresenta componentes que precisam de eventuais trocas, causando um risco de contaminação por meio de possíveis vazamentos. Pode-se observar na Figura 2.1 um esquemático representando o sistema de direção hidráulica.

Quando um sistema de direção hidráulica é comparado com um sistema de direção elétrica, a principal diferença que é observada é a assistência. A bomba de direção do sistema hidráulico é movida por uma polia que é ligada ao virabrequim do automóvel. Dessa forma, esse torque proveniente do motor acaba resultando em um consumo do veículo. A bomba continua promovendo

a circulação do fluido pelo sistema, mesmo quando não é requerida, como resultado, há um consumo desnecessário de energia (KOZUMA; ARITA; TSUDA, 2005). O sistema de direção elétrica apresenta o torque de assistência oriundo de um motor elétrico acoplado ao sistema de transmissão de esterçamento. Alguns estudos mostram que uma redução do consumo de combustível do veículo com um sistema de direção elétrica EPS (*Electric Power Steering*) pode ser de até 5,5% (SHIMIZU E KAWAI, 1991).

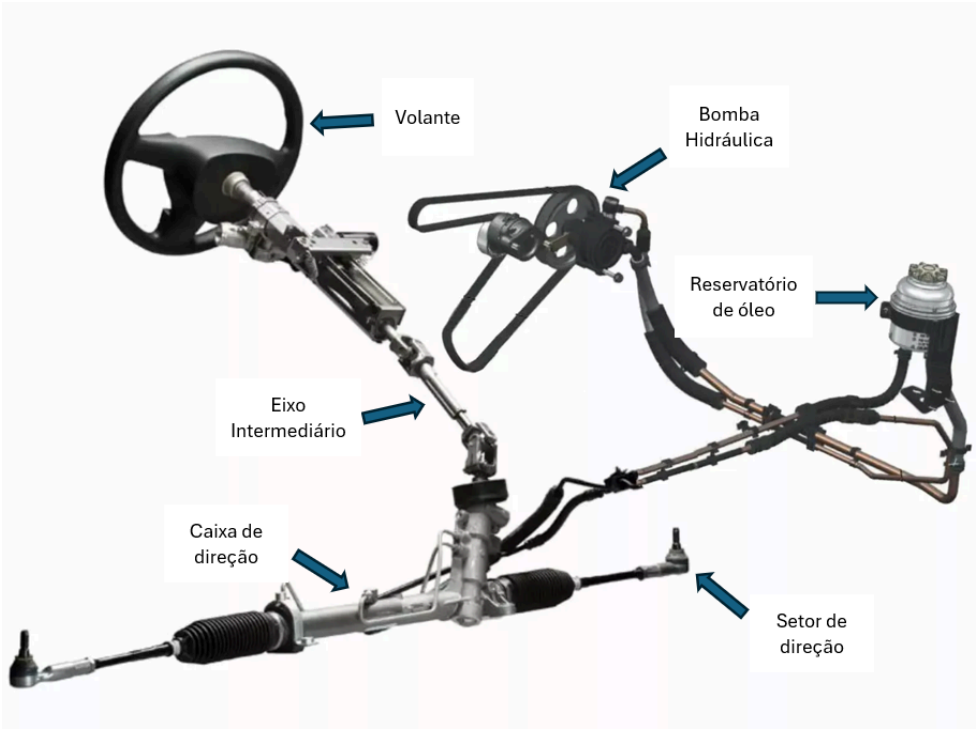


Figura 2.1: Componentes fundamentais do sistema de direção hidráulica Adaptador, 2024).

Todo sistema elétrico de direção apresenta três componentes básicos: unidade de controle eletrônico, assistência por motor e sensores de leitura de torque (SHAOYUN, YI, 2015). Um sistema de direção elétrica pode ser dividido em três grandes grupos baseados na posição em que a assistência está posicionada: do tipo coluna (CEPS), do tipo pinhão (SPEPS) e do tipo *rack* (REPS). Pode-se observar, respectivamente, nas Figuras 2.2, 2.3 e Figura 2.4 os três modelos de EPS.

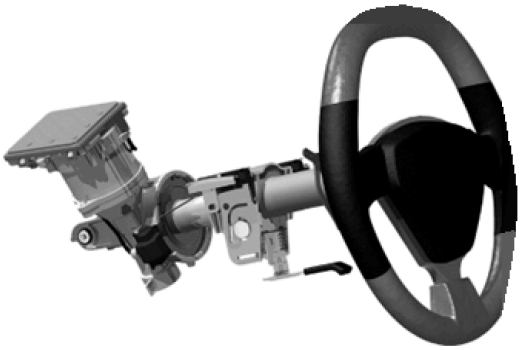


Figura 2.2: Sistema de direção elétrica com assistência posicionada na coluna (CEPS) (NEXTEER, 2024).

Figura 2.3: Sistema de direção elétrica com assistência posicionada diretamente ao setor de direção (SPEPS) (NEXTEER, 2024).

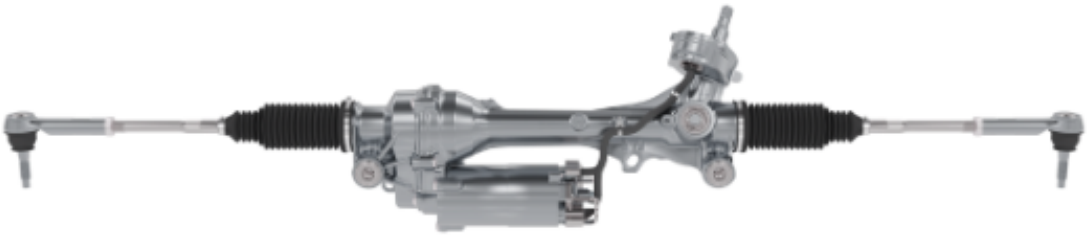


Figura 2.4: Sistema de direção elétrica com assistência posicionada diretamente ao *rack* (REPS) (NEXTEER, 2024).

A coluna EPS apresenta uma funcionalidade principalmente ligada ao torque do sistema. Sua principal aplicação é ao assistir o torque de entrada do volante dado pelo motorista para que o movimento de esterçamento seja facilitado. O motor elétrico acoplado ao sistema apresenta

diferentes níveis de resposta que se baseiam na atual situação do veículo. Para que seja verificada uma curva de torque verdadeira, é necessário desenvolver um modelo que simule uma direção elétrica (LIU, 2016). A leitura dos dados do motor elétrico para que a assistência seja executada é feita por meio de sensores ligados no centro de rotação da coluna de direção e, em paralelo com as demais informações provenientes da central do veículo, definem o torque necessário. É possível observar que conforme a velocidade aumenta, a assistência diminui na razão contrária. No caso da condução do veículo em baixas velocidades ou em situações de alta manobrabilidade – como estacionamentos ou retornos – é exigido do CEPS que a maior parte do torque necessário seja exercido pelo motor elétrico e não pelo motorista, o que acarreta em uma situação de maior segurança e conforto ao condutor. Já para o caso de condução do veículo em maiores velocidades, por questões de segurança, é necessário que o motorista realize um esforço maior para promover o esterçamento das rodas. Isto significa que com o aumento da velocidade do veículo, o torque de assistência produzido pelo motor elétrico é reduzido a fim de enrijecer a direção e, naturalmente, fazer com que o condutor realize um esterçamento mais moderado no volante ocasionando, desta forma, uma condução mais segura (SILVA, 2018). A Figura 2.5 mostra um exemplo de resposta de torque baseado na velocidade do veículo e torque de entrada do volante. Tais leituras são feitas por meio de simulações em bancada e testes reais de aplicação no quais consistem em montar um ambiente de uso e estressar o sistema em diversas situações.

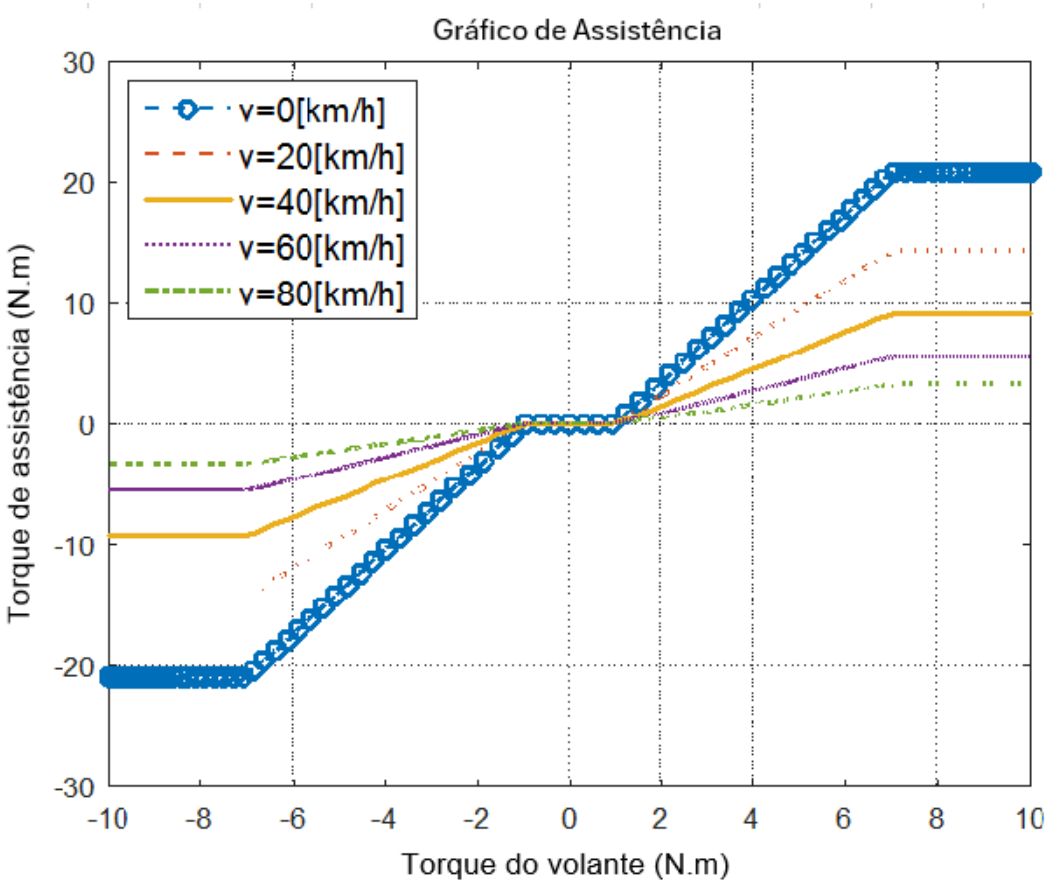


Figura 2.5: Resposta de torque baseado no torque de entrada do volante com a velocidade do veículo (HYUK, JUN, CHANG, 2017).

O sistema CEPS é comumente utilizado em veículos menores, os quais não precisam de muita assistência devido ao seu menor peso. Dessa forma, o motor elétrico fica posicionado dentro

do habitáculo do veículo. Agora, para os demais tipos de direção, SPEPS e REPS, o motor de assistência fica posicionado dentro do cofre do veículo por se tratar de um automóvel maior e com mais espaço. A Figura 2.6 mostra a posição que o motor é posicionado logo atrás do volante do motorista.

Quando tópico observado é comunicação, o sistema que é utilizado pelos controladores do motor é o padrão CAN (*Controller Area Network*). A rede CAN é um protocolo serial de comunicação desenvolvido pela Bosch na década de 80. Ela define um padrão para uma eficiente e confiável comunicação entre sensores, atuadores, controladores e outros elementos de aplicação em tempo real (HENRIK, 2006). Essas centrais de comunicação possuem o controle do motor, injeção de combustível, ponto de ignição e todos os demais aspectos do veículo, assim como as informações de torque do volante e velocidade das rodas que são primordiais para a definição de assistência do conjunto. Na Figura 2.7 é possível identificar o controlador da rede CAN da coluna montado ao lado do motor elétrico.

Figura 2.6: Posição do motor elétrico na coluna de direção (NOAL, 2015).

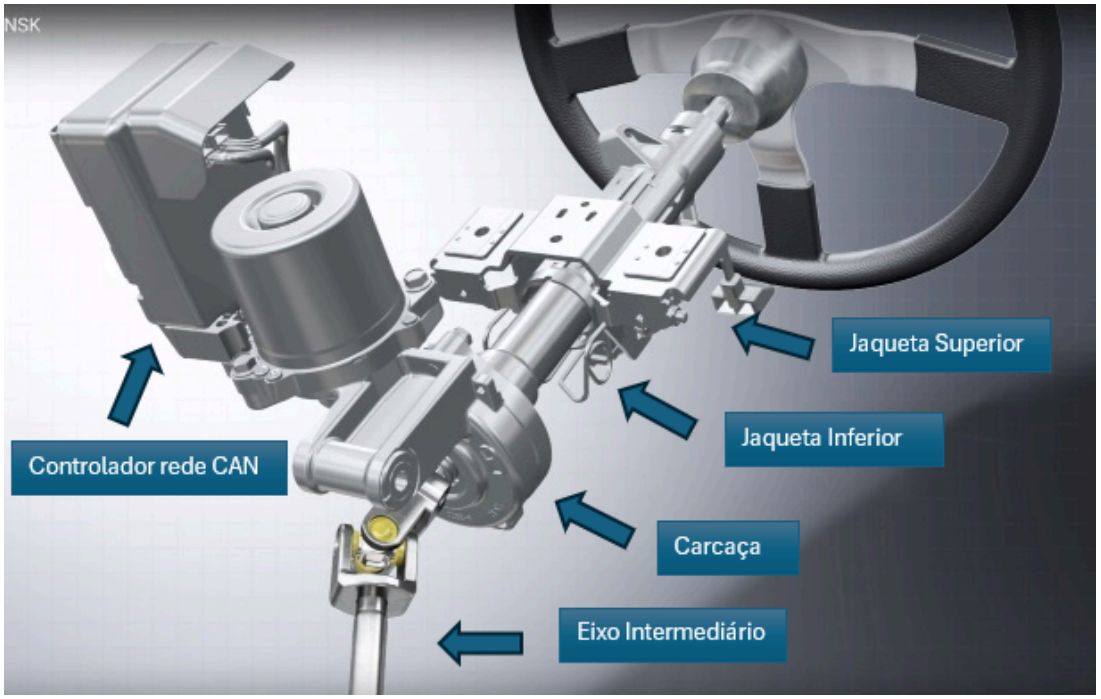


Figura 2.7: Controlador de rede CAN da coluna de direção elétrica (NSK, 2024).

A coluna é dividida em quatro conjuntos: jaqueta superior, a jaqueta inferior, o conjunto de assistência e o eixo intermediário O travamento desta no automóvel é feita mediante três pontos de fixação. Dois dos pontos estão localizados na jaqueta superior e o terceiro está localizado no mecanismo de assistência. O eixo central no qual o volante está acoplado é apoiado por um rolamento de esferas nas paredes internas da jaqueta superior. O sistema é baseado em um eixo central com o lado de entrada de torque e o lado de saída de torque. Costuma-se definir o eixo do lado do volante como o eixo de entrada e o eixo do lado contrário como eixo de saída. Todo o conjunto é montado na carcaça onde são encontrados o engrenamento do eixo central e um eixo sem fim de transmissão de torque proveniente do motor elétrico. Entre o eixo sem fim e o motor, está localizado um acoplamento. É possível observar o sistema no esquema apresentado na Figura 2.8.

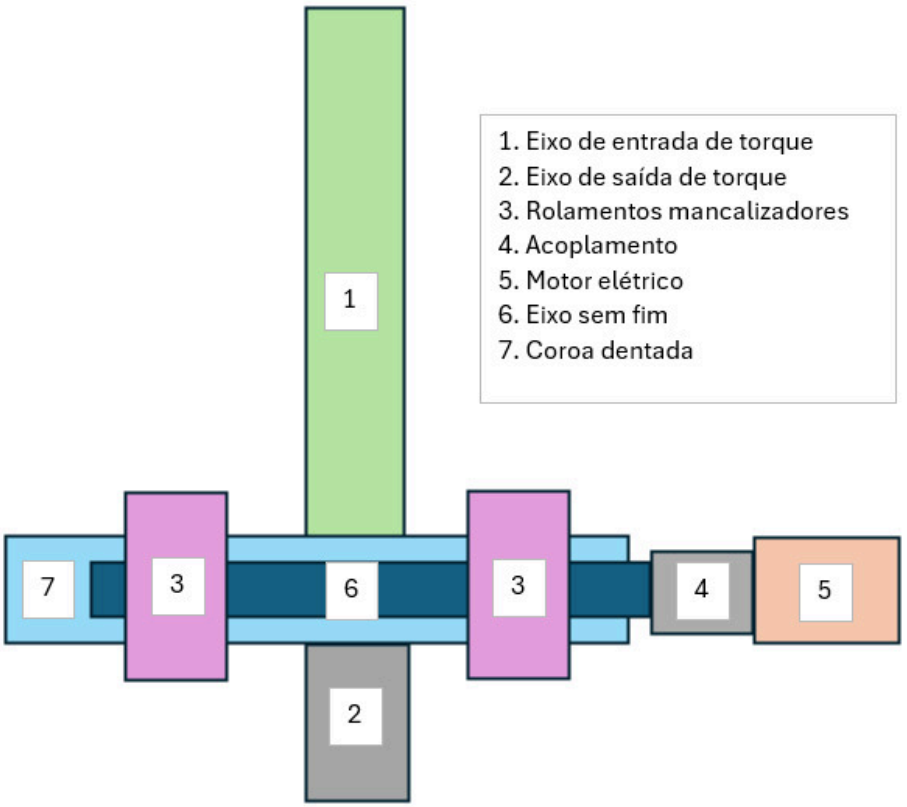


Figura 2.8: Esquemático da construção mecânica do sistema de transmissão de torque da coluna de direção elétrica (NEXTEER, 2024)

3. A TRANSMISSÃO DE TORQUE NA COLUNA DE DIREÇÃO ELÉTRICA

Acoplamentos são elementos mecânicos de fixação entre dispositivos rotacionais cujo objetivo principal é transmitir torque e potência (MENDI, 2018). Geralmente, acoplamentos são utilizados para unificar eixos que são construídos em partes separadas. Essa solução é proveniente de problemas de construção de eixos muito longos que devem trabalhar com baixas ou altas rotações. Com a repartição deles e unificação por meio de acoplamentos, o sistema de rotação tem o seu desgaste minimizado e a vida útil melhorada. Além disso, a manutenção se torna um processo mais fácil com a possibilidade de desconectar os eixos pelos acoplamentos.

Existem diversos grupos de acoplamentos para as mais diversas aplicações. A grande diferença está relacionada ao sistema no qual o acoplamento será instalado. Dois grupos de aplicação podem ser definidos como: para um sistemas que apresenta vibrações ou desalinhamentos, o grupo dos acoplamentos flexíveis é o mais indicado, entretanto para os sistemas nos quais apresentam sincronismo torcional ou reversão de carga constante, os acoplamentos rígidos são os mais indicados (STEWART, 2019).

Um acoplamento rígido consiste em dois lados simétricos com um sistema de engaste em cada lado. Esse sistema de fixação pode ser feito por parafusos, estrias dentadas, mordentes dentre outros mecanismos. Pode-se observar na Figura 3.1 um acoplamento rígido com a fixação por meio de parafusos.

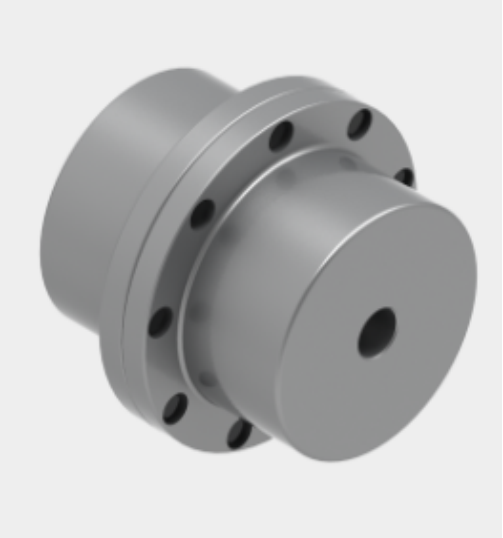


Figura 3.1: Acoplamento rígido (Acoplast, 2024).

Os acoplamentos apresentam em sua maioria aços liga ou alumínio como seu material constituinte, porém existem algumas variações construídas a base de polímeros. Com a tecnologia atual, a definição dos materiais de construção se tornou algo mais assertivo. Com a utilização de *softwares* de análise de elementos finitos, o comportamento dos acoplamentos pode ser estudado a fim de prever possíveis fadigas do sistema e evitar falhas catastróficas. Na Figura 3.2 observa-se um ensaio de estresse de um acoplamento no qual está em uma vista de seção.

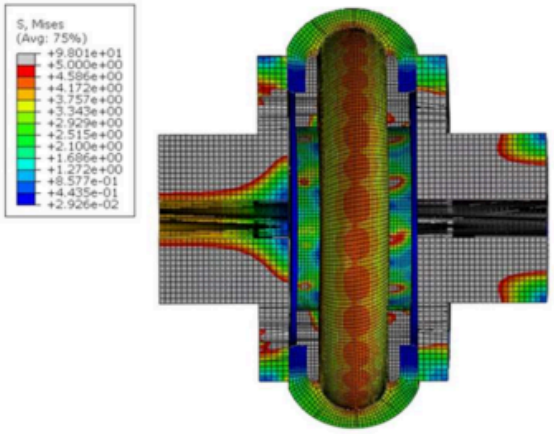


Figura 3.2: Ensaio de resistência de um acoplamento (GOMES, 2023).

Os acoplamentos são elementos importantes para a construção de máquinas e seu correto funcionamento separa completamente o conjunto da falha. Geralmente, falhas catastróficas desses componentes estão majoritariamente ligadas a fatores construtivos e não por falta de manutenção. Desalinhamentos, desbalanceamentos, erros nas definições de folgas, definições errôneas de rotação e torque são exemplos comuns de manutenções corretivas. A manutenção corretiva é a que se realiza sobre uma máquina que esteja com um funcionamento comprometido ou tenha parado de funcionar (MARÇAL, 2000).

O uso de acoplamentos na coluna de direção elétrica é uma aplicação de extrema importância e requer cuidados extras. Pelo fato de que o ambiente no qual eles são manuseados é, muita vezes, dinâmico e com uma alta circulação de componentes, fica evidente que esse processo deve ter o máximo de controle. A correta instalação não só depende da própria peça, mas também de todo o conjunto que engloba. Os demais componentes envolvidos precisam estar nas suas melhores condições para que o sistema funcione sem falhas. O alinhamento do dispositivo de inserção do anel é um fator crítico para garantir a qualidade final do produto. Por uma questão de custo e ruído, o acoplamento utilizado na coluna de direção tem como material construtivo principal um polímero. A inserção dos aneis elásticos é executada nas extremidades e gera uma deformação elástica no diâmetro da interface de transmissão de torque. Com isso, é evidente que para que o anel seja montado da forma correta sem riscos ao acoplamento, o alinhamento é um fator crítico. A execução do processo com falhas no alinhamento pode acarretar na degradação na função primária da peça assim como nos mancais de rolamento que apresentam papeis importantes na mancalização de cargas.

4. MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS

O processo de desenvolvimento de um equipamento em série de manufatura apresenta um sequenciamento de etapas. Para cada uma delas, são necessárias validações de diversos departamentos empresariais. Contudo, para a realização deste estudo, será dado enfoque para a área da engenharia de manufatura, a qual deteve a total aplicação do cunho técnico presente no trabalho. É possível observar na Figura 4.1 um fluxograma que recria as etapas de desenvolvimento de um equipamento de produção em série.

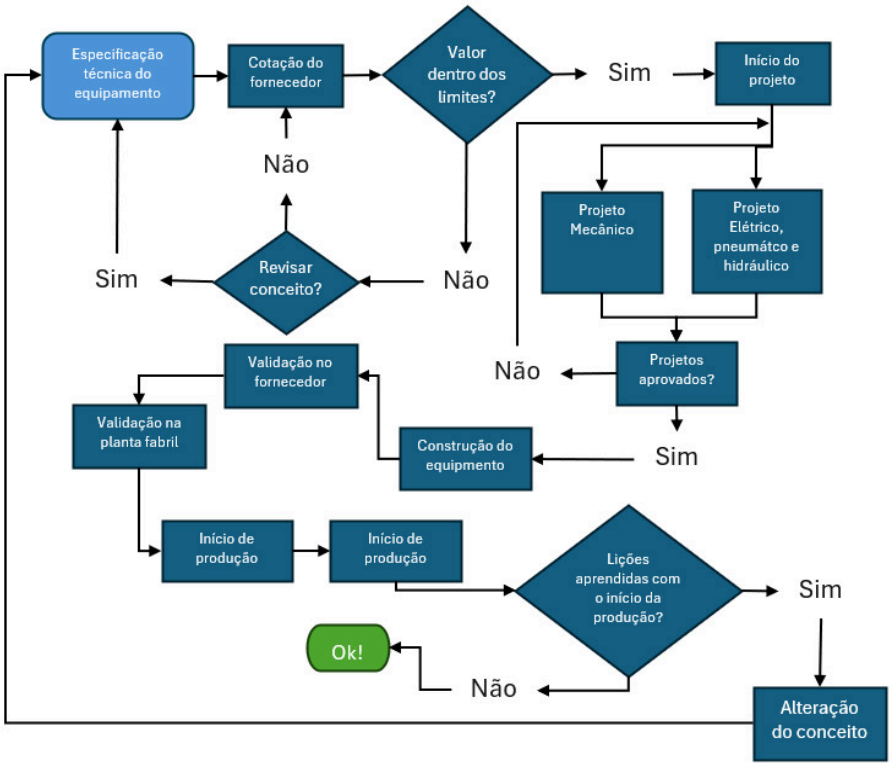


Figura 4.1: Fluxograma do processo de desenvolvimento de um equipamento de produção em série (NEXTEER, 2024).

Visto que a máquina do estudo já existe e já está atuando na linha de produção, o processo de desenvolvimento acaba sendo menor. A etapa que difere de uma máquina completamente nova é a validação em piso fabril da empresa construtora. A logística de retirar a máquina do seu lugar de trabalho e enviar até o fornecedor não é algo viável, dessa forma, todas as validações são feitas no lugar onde ela está a atuar. Além disso, retirá-la do local de trabalho gera um impacto muito elevado na cadeia de produção. É papel do fornecedor fazer as visitas técnicas em paralelo com o responsável para que as devidas alterações sejam validadas.

O processo de definição do conceito é algo que, muitas vezes, toma alguns meses de trabalho. São diversas rodadas de reuniões com discussões sobre o projeto que sofre diversas alterações. Para uma melhor visualização do projeto, são utilizados *softwares* de CAD (*Computer Aided Design*) para executar o *design* das peças e alocação dos componentes na máquina. Uma vez que os conceitos técnicos, pneumáticos e elétricos são definidos, a etapa de construção se inicia. O objetivo desse processo de adaptação é implementar a manufatura de um novo produto nas duas máquinas já existentes e a aplicação das estratégias de inserção acontece na etapa final de validação do processo.

A máquina possui uma ferramenta específica para executar a inserção. Existe uma servo prensa dedicada na operação. A Figura 4.2 mostra um exemplo de uma servo prensa.

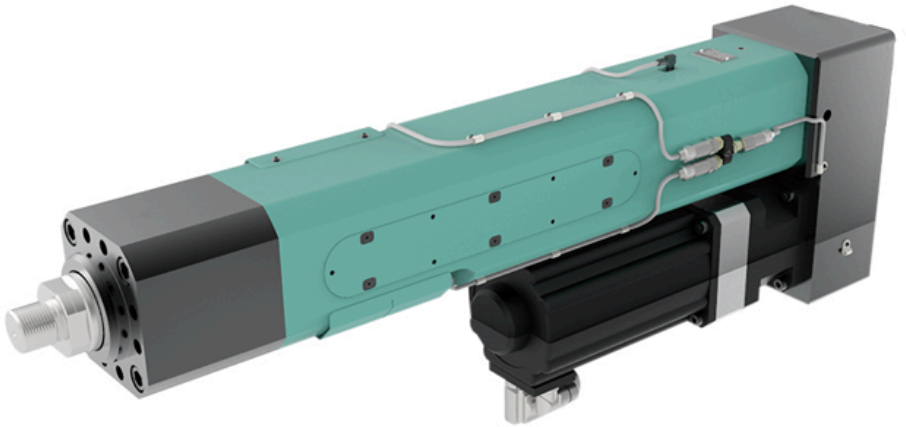


Figura 4.2: Servo prensa (TOX PRESSOTECHNIK, 2024).

Servo prensas são ferramentas de aplicação de carga com o objetivo da deformação controlada de materiais. Por sua alta flexibilidade, controlabilidade, simplicidade e alta vida útil, estão fortemente presentes na automação (BOZDANA, 2015). Consiste em um fuso de esferas ou um fuso de rolos planetários de alta precisão que é movido por um servo motor. Dessa forma, a repetibilidade e reprodutibilidade do movimento e carga aplicados pelo equipamento é muito elevado e o alto nível de construção garante uma longa vida útil do produto. Essa ferramenta fornece um controle muito importante para a indústria de linha de produção em massa.

Apesar de uma servo prensa ser ferramentas de alta precisão, é de cunho do responsável técnico executar estudos estatísticos ao final do processo para validar a performance do equipamento. A partir de uma amostragem de peças e utilizando o *software* Minitab, o equipamento precisa atingir um índice de Cp (índice de capacidade de um processo de produção) superior a 1,67 para os parâmetros de carga e deslocamento controlados pelo processo. O Cp estuda a variação que pode ocorrer durante a operação do processo. O uso de técnicas estatísticas tornou-se

imprescindível em todo o ciclo de vida de um produto. Na indústria em particular, estudos relacionados à determinar o quão bem um processo um processo atende às tolerâncias especificadas merecem ser destacados como cruciais em programas de garantia de qualidade. Tais estudos, geralmente denominados de análise de capacidade, são reconhecidos como importantes instrumentos de decisão e seus resultados podem gerar ações importantes na gestão de processos (DELERYD, 1996). Na Tabela 4.3 pode-se observar os intervalos de referência do índice Cp.

Cp	Itens não conformes (PPM)	Interpretação
$Cp < 1$	Acima de 2700	Processo incapaz
$1 \leq Cp \leq 1{,}33$	64 a 2700	Processo aceitável
$Cp \geq 1{,}33$	Abaixo de 64	Processo potencialmente capaz

Tabela 4.3: Intervalos de referência para análise do índice Cp. (MONTGOMERY, 2004).

Conforme está mostrado na Tabela 4.3, para que um processo seja capaz de atender as tolerâncias é necessário apresentar um Cp maior que 1,33. Porém, como os dois componentes desenvolvidos neste estudo são considerados de alta severidade e estão relacionados à segurança do condutor do veículo, é exigido por regulamentos internos da empresa um nível maior de certificação de 1,67 como antes mencionado.

O processo de inserção do anel antes do processo de adaptação era feito por uma máquina completamente manual. O operador alimenta os aneis superior e inferior nos mandris de inserção e o acoplamento no centro do dispositivo. Após isso, com uma alavanca movimenta o sistema até um batente mecânico pré definido que garante a posição do anel. O conceito de movimentar a alavanca até batente apresenta uma falha em seu funcionamento. O produto, como qualquer outro, é construído com tolerâncias, logo, quando o lote de peças é trocado, é possível que algumas peças apresentem o comprimento maior ou menor. Além das tolerâncias, o acoplamento é produzido por um processo de injeção com um molde de oito cavidades que podem conter diferenças de desgaste com o tempo de uso. Dessa forma, é frequente o ajuste do batente final da alavanca, caso contrário, existe o risco da posição do anel não estar de acordo com os desenhos de especificação do produto. Por se tratar de um movimento manual, não é possível efetuar estudos de validação de deslocamento e carga. O motivo disso é proveniente da não linearidade do movimento gerado pela força humana. Além da máquina apresentar diferentes escalas de operadores, o comportamento dos mesmos interfere completamente no desenvolvimento do estudo. A Figura 4.4 (b) mostra as interfaces de operação.

A máquina efetua o controle de carga do processo por uma célula de carga posicionada na parte superior do mandril. Apesar da célula de carga ser validada, trata-se de um dispositivo externo à máquina. Em contrapartida, uma servo prensa é um sistema mais robusto que apresenta o seu controle de carga selado em seu interior. Comparando a linearidade do movimento do mandril de inserção, a máquina manual era construída por patins mecânicos deslizantes. Existia o risco de contaminação por algumas partículas metálicas o que pode gerar desalinhamento com um movimento extremamente repetitivo. A servo prensa é construída com o seu carro principal de

deslocamento sobre um fuso de esferas de alta precisão. É um sistema compacto e robusto que traz alta fidelidade à ferramenta. Com isso fica evidente que as máquinas apresentam diferenças construtivas muito relevantes para a garantia da segurança do processo de inserção e a adaptação é uma melhoria necessária para a produção do produto.

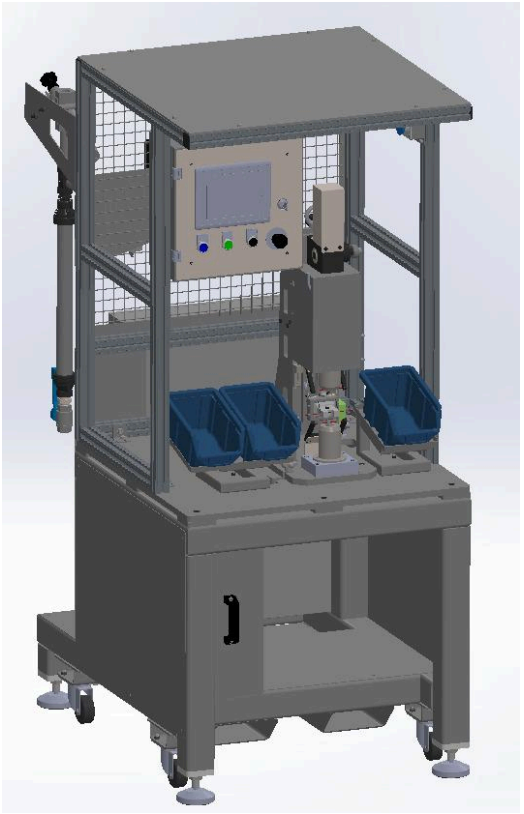


Figura 4.4 (a): Máquina manual de inserção do anel (NEXTEER, 2024).

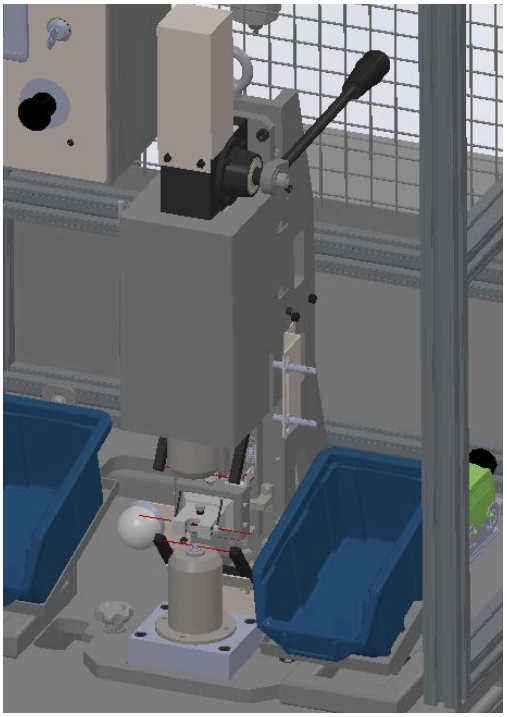


Figura 4.4 (b): Interface do operador com a máquina (NEXTEER, 2024).

O objetivo do projeto é adicionar essa operação à uma máquina com a inserção guiada por uma servo prensa. Dessa forma, essa implementação tornaria o processo mais previsível e seguro, pois a força deixaria de ser proveniente da mão do operador. Pode-se observar a Figura 4.5, a qual mostra uma visão em corte da máquina automática. A máquina apresenta um sistema de alimentação automático do acoplamento e de ambos os aneis onde o operador necessita apenas carregar uma panela vibratória na parte de trás da estrutura.

O controle de inserção é feito por meio de uma estratégia de parâmetros os quais são desenvolvidos pelo próprio *software* dedicado da servo prensa. Com toda a estrutura mecânica finalizada, a etapa do gráfico de inserção é executada. O objetivo inicial é identificar como o produto responde e qual seria o comportamento perante sua própria variação geométrica. Foram executadas cerca de 500 inserções e foram sobrepostos os gráficos. A Figura 4.6 mostra a sobreposição de algumas inserções durante os testes de validação.

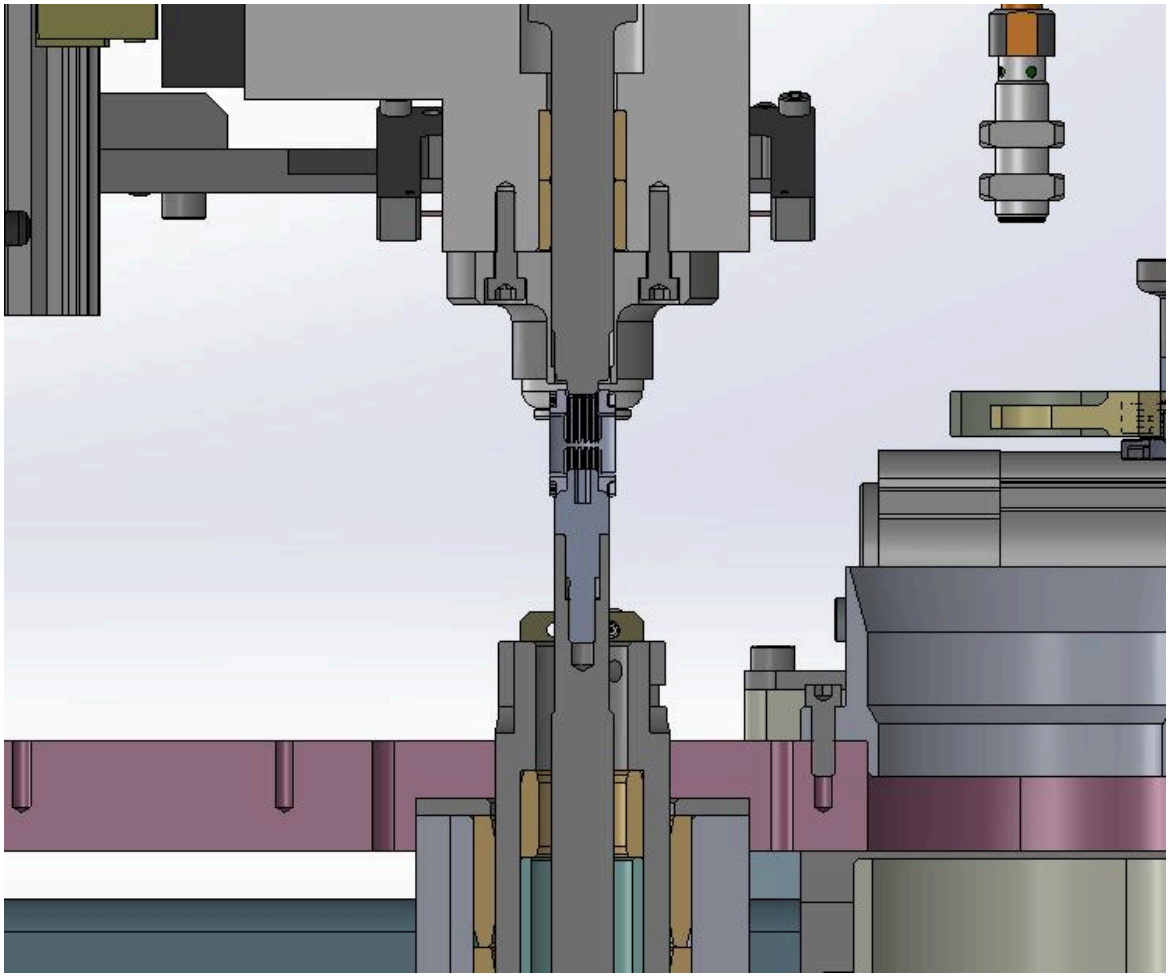


Figura 4.5: Vista em corte da máquina automática de inserção do anel no acoplamento (NEXTEER, 2024).

De acordo com um procedimento interno, todos os processos de prensagem e inserção devem apresentar o controle de carga de engajamento, deslizamento e um objetivo final. A carga de engajamento é definida a fim de identificar algum tipo de desalinhamento da estrutura da máquina ou do próprio componente. Não apenas um valor nominal de carga em kN, mas o momento onde a carga irá ocorrer em milímetros. A carga de deslizamento é definida a fim de controlar o arraste que ocorre da peça inserida com a peça que sofre a inserção, ou seja, o atrito gerado entre ambas as peças.

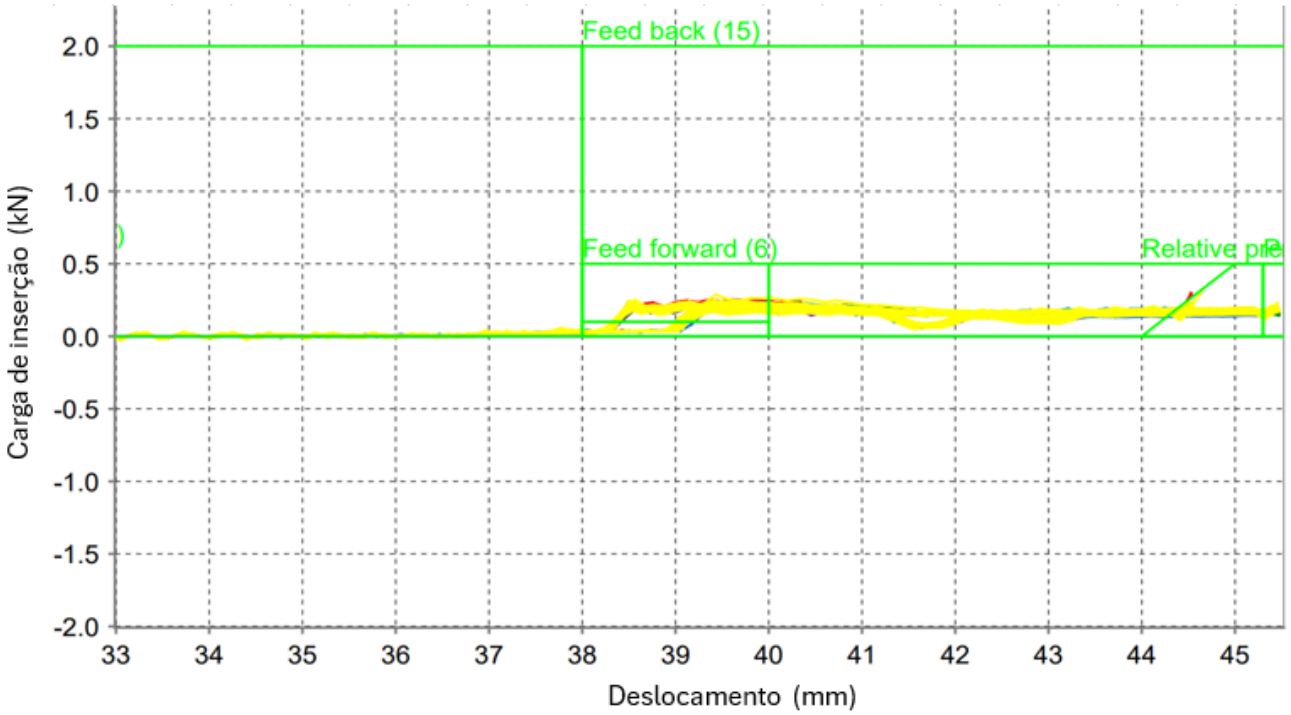


Figura 4.6: Gráfico de sobreposição de ciclos de inserção provenientes dos estudos de validação (NEXTEER. 2024).

Levando em consideração que o componente apresenta uma variação conhecida e permitida pelo desenho técnico de especificação, haverá um limite máximo de carga. E, por último, o objetivo final da estratégia deve ser baseado nas características de produto do componente. Apesar de não existir nada nas especificações de produto relacionado, a ferramenta de inserção detém diferentes formas de controlar o objetivo final. Para os primeiros tópicos, a estratégia de prensagem não difere na maioria dos casos, porém o objetivo final pode ser uma carga, posição ou momento de inflexão desejado. Para o acoplamento, como o desenho de produto pede para que o anel fosse inserido até o contato com a outra extremidade de inserção, a estratégia de prensagem deve ser construída por um momento de inflexão final. A Figura 4.7 mostra um exemplar de um gráfico utilizado na validação da máquina que mostra o momento de inflexão que a servo prensa busca. Ao final do gráfico, após os 45 mm de deslocamento, ocorre a inflexão que pode ser observada pelo aclive final. Isso significa que a servo prensa chegou a uma posição de batente mecânico da própria peça e garante a correta posição do anel. Para a correta programação é definida uma taxa de carga por milímetro na qual a servo prensa usará como parâmetro limite para não danificar o acoplamento. O valor de entrada em kN/mm do *software* geralmente é maior que o limite delimitado no desenho mecânico. Caso a servo prensa identifique um carga maior que a máxima especificada, automaticamente o processo é interrompido e a peça rejeitada.

Detalhes da programação da estratégia não serão expostos a título de segredo industrial, porém a Figura 4.7 mostra detalhes para o melhor entendimento e visualização das três etapas de inserção desenvolvidas para execução desse trabalho. A janela do gráfico *"Feed Forward (6)"* apresenta o objetivo da carga de engajamento, ou seja, momento do primeiro contato com a peça. Apesar das janelas se sobreporem, podemos identificar que o limite máximo de carga é de 500N durante todo o gráfico, que é o que as especificações definidas pelo time de desenvolvimento de produto. Por final, o gráfico apresenta ao final uma janela chamada "Relative point" que recria a inclinação que a servo prensa busca para que a taxa de carga por milímetro definida pelo processo

seja atendida. As etapas *"Feed back"* e *"Feed Forward (5)"* são comando de movimentação da servo prensa, porém não estão relacionados com a inserção.

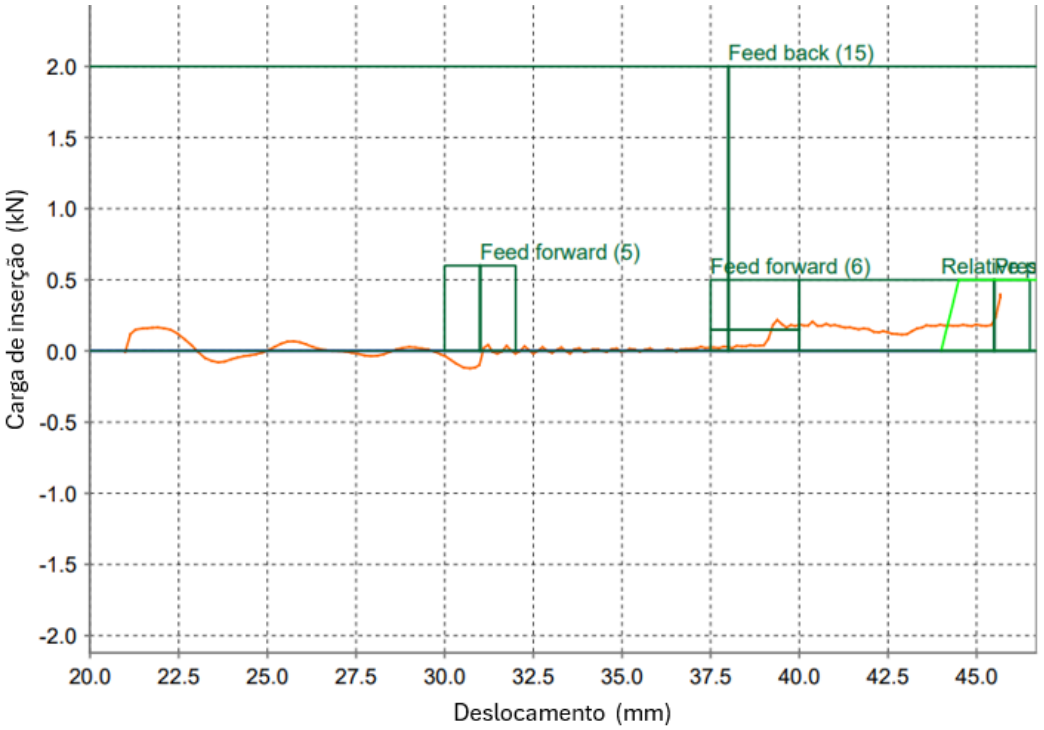
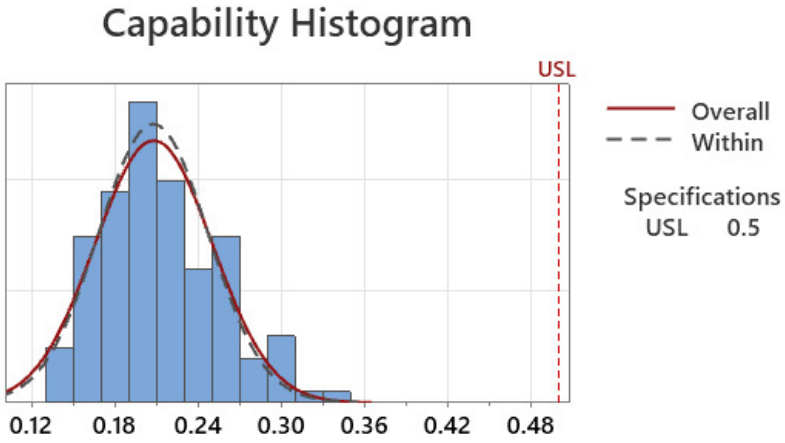


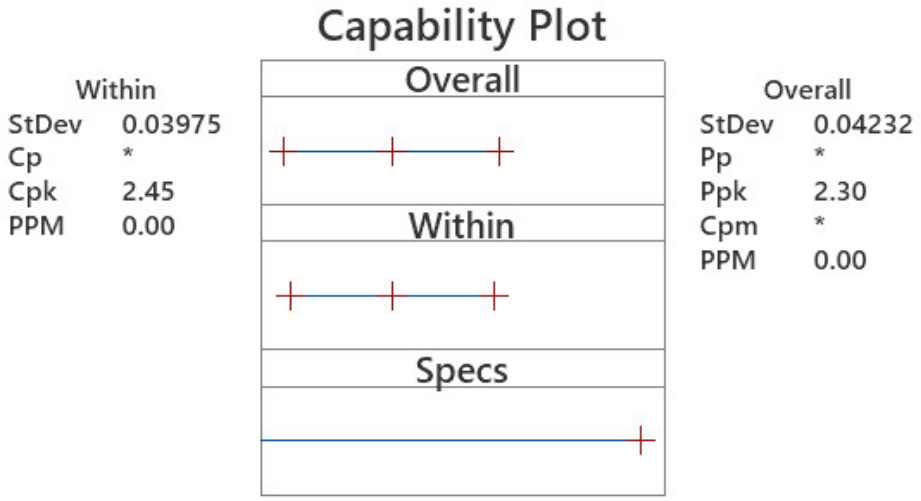
Figura 4.7: Gráfico de inserção do anel no acoplamento (NEXTEER, 2024).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

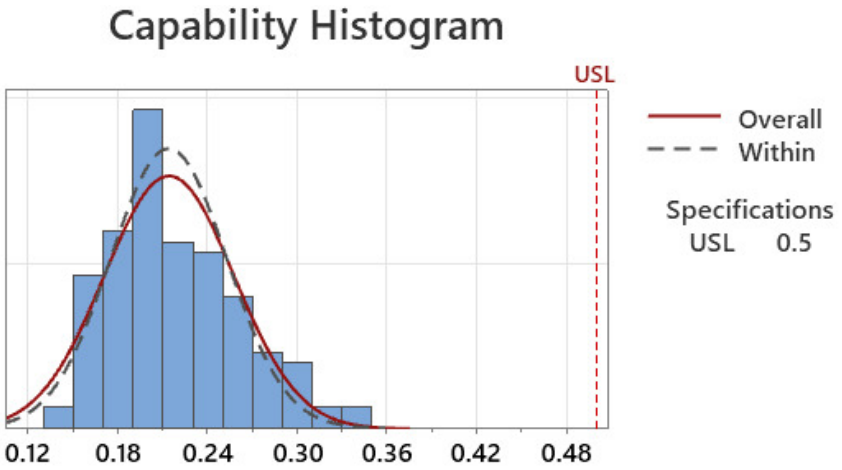
Com o término de toda a aquisição de dados e definição das posições e cargas de engajamento, deslizamento e inflexão, inicia-se o processo de validação. Por norma da empresa, o número mínimo de peças para efetuar a validação do Cp é de 125. Com isso, é utilizada a carga de inflexão final pois é o objetivo final e ponto de maior criticidade do processo. Todos os valores são manualmente identificados e passados para o programa Minitab e é calculado o Cp. Os gráficos da Figura 5.5 mostram o gráfico gerado com a dispersão normal final do processo com os valores das 125 peças. Os limites de carga aceitos pela especificação de produto apresentam um limite de 0 kN até 0,5 kN para o anel superior e inferior. Os resultados provenientes do estudo foram de 2,45 para o anel superior e 2,44 para o anel inferior. Tais resultados são consideravelmente superiores ao mínimo desejado e estão de acordo com as diretrizes do procedimento de validação da empresa. A Figura 5.5 demonstra os gráficos e dados gerados pelo *software* estatístico Minitab.



(a): Dispersão final do processo de inserção do anel inferior (NEXTEER, 2024).



(b): Dados de capabilidade do anel inferior (NEXTEER, 2024)



(c): Dispersão final do processo de inserção do anel superior (NEXTEER, 2024).

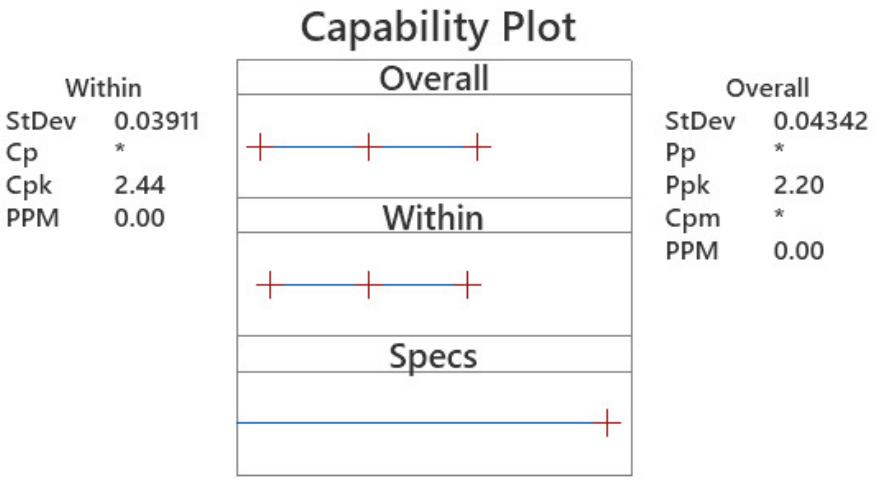


Figura 5.5 (d): Dados de capabilidade do anel superior (NEXTEER, 2024)

Após a finalização do processo, esses resultados estatísticos mostram uma melhora significativa na segurança da operação. O processo teve os seus modos de falha mitigados e o risco de inserções executadas sem os corretos controles de carga e alinhamento extinguidos. Hoje, a máquina é capaz de reprovar automaticamente uma peça a partir dos parâmetros desenvolvidos com as estratégias de inserção e parar o processo para que novos rejeitos não sejam gerados. A máquina utilizada anteriormente não possuía esse controle e era necessário que o operador tomasse a decisão de aprovar ou não a peça. Ela foi removida do processo e será utilizada para outras demandas da produção da empresa como treinamentos de operadores e exposições de lições aprendidas.

6. CONCLUSÃO

Com o objetivo de melhorar o sistema de manufatura de componentes críticos como o acoplamento da coluna de direção elétrica, foi desenvolvido um novo controle de inserção e estratégias de prensagem a partir de um equipamento já existente. Nesse novo controle, o item principal que garante a segurança do processo é a ferramenta servo prensa. Para o desenvolvimento da estratégia, foram processadas em torno de 500 ciclos e seus provenientes gráficos analisados a fim de identificar um padrão do produto. Após parametrização, foram executadas 125 peças para realizar a validação da capabilidade do processo e garantir a segurança da inserção.

Portanto, comparando os valores resultantes dos testes de validação da máquina manual com a máquina guiada pela servo prensa, houve uma melhora significativa na segurança e robustez do processo. Além disso, a máquina automática tem a capacidade de rejeitar e evitar que uma peça não conforme prossiga os seguintes processos de montagem e que seja entregue para o cliente final.

7. AGRADECIMENTOS

Expresso profundamente minha gratidão a minha família, meu pai, Paulo Roberto Mengue, minha mãe, Solange da Silva Mengue e minha irmã Carolina da Silva Mengue que me apoiaram durante todo o desenvolvimento do presente trabalho e durante todos os longos anos de formação na graduação de Engenharia Mecânica. Além de minha família, gostaria de expressar também meu agradecimento ao professor Sérgio Boscato, meu orientador no qual exerceu um excelente trabalho me guiando durante todo o processo de desenvolvimento dessa análise que, com seus conhecimentos, foi possível exercer um trabalho fluido e coeso. Outro agradecimento vai para o

professor José Rogério Fazzi que me auxiliou nos parâmetros do processo industrial de inserção. E, por último, os meus agradecimentos vão para meu querido gestor na época Gustavo Konzen e colega Gabriel Moreira Magnus. Obrigado pelas oportunidades e ensinamentos que vocês me proporcionaram e, com certeza, cheguei onde estou devido ao completo apoio de vocês.

8. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

A.TOLGA BOZDANA. “Mechanisms, classifications, and applications of servo presses: A review with comparisons**”.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture 230, 2015

Barilli, R. J. C., 2013. “Análise de Falhas em Rolamentos Utilizando a Técnica Envelope”. Projeto de Graduação. Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CNN Brasil. Strada líder: veja os 30 carros mais vendidos no país em fevereiro. Disponível:https://www.cnnbrasil.com.br/auto/strada-segue-lider-veja-os-30-carros-mais-vendidos-no-pais-em-fevereiro/

DADDA, ARTUR GOMES, ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM ACOPLAMENTO FLEXÍVEL MEDIANTE DESALINHAMENTO ENTRE EIXOS, 2023.

DELERYD, M.Process capability studies in theory and pratice. Licentiatethesis, LuleaUniversityof Technology,Lulea. Sweeden. 1996.

FUNDEP Fundação de Apoio da UFMG **-** Setor automotivo brasileiro celebra espansão e anuncia ciclo recorde de investimentos Disponível em**:** <https://mover.fundep.ufmg.br/setor-automotivo-brasileiro-celebra-expansao-e-anuncia-ciclo-recorde-de-investimentos/> Acesso em 4 set. 2024.

Gillespie Hall, A.S., Jr., Kinematics and Linkages Design, Pretice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1961

HYUK-JUN-CHANG, An application of explicit model predictive control to electric power assisted steering systems (2017).

IATF (International Automotive Task Force) 16949-2016. Norma de Sistema de Gestão da Qualidade.

KARL HERIK, Martin T’orngren and Lars Nielsen. Vehicle Applications of Controller Area Network**.** 2006.

KOZUMA, F.; ARITA, T.; TSUDA, H. Development of Energy Saving Power Steering. 6th JFPS International Symposium on Fluid Power, Tsukuba, p. 297-300, nov, 2005

MARÇAL, Um Método para Detectar Falhas Incipientes em Máquinas Rotativas Baseado em Análise de Vibrações e Lógica *Fuzzy,* 2000

MONTGOMERY, Douglas C. Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**.** São Paulo: 4. ed. Editora LTC, 2004.

NOAL LUIS, 2015 Curiosidades: como funiona direção elétrica? https://www.conexaoautomotivabr.com/2015/08/curiosidades-como-funciona-direcao.html Acessado em 14/09/2024.

NSK. Coluna de direção elétrica (EPS) https://www.nsk.com.br/coluna-de-direcao-eletrica-341.htm#tab1708 Acessado em 15 set. 2024.

QINGHE LIU, WEIGUANG KONG AND TAO LI. **T**he Assist Curve Design for Electric Power Steering System, 2016.

RAHMAN, N.A.A**.** Lean Manufacturing Case Study with Kanban System Implementation**,** Procedia Economics and Finance 7 (2013) 174–180, https://doi.org/10.1016/S2212-5671(13)00232-3.

RÖPKE, Sascha et al.. Uma introdução às normas da série ISO 9000. São Paulo, 1996. 7p. Trabalho apresentado no seminário sobre as normas ISO 9000 – Curso de graduação em química, Universidade de São Paulo.

SHAOYUN ZHANG, YI WANG. Study of Electric Power Steering System, 2015. International Conference on Computer Science and Intelligent Communication (CSIC 2015).

SHIMIZU, Y.; KAWAI, T. Development of Electric Power Steering. SAE Transactions, v. 100, p. 1–15, 1991.

SHINGLEY, JOSEPH E, Elementos de Máquinas vol.1 - 1984

SILVA, Rodolfo Medeiros Araújo da. Sistema de monitoramento de temperatura e umidade para uma câmara anecoica. 2015. 38f. (Trabalho de Conclusão de Curso - Monografia), Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande – Paraíba - Brasil, 2015. Disponível em: http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/18565. Acesso em 15 set. 2024.

STEAWART. Surface Productions Operation, 2019.

TOX PRESSOTECHNIK, Manual Servo prensas, 2024

VENKANNABABU MENDI. Design and Analysis of Rigid Flange Couplings, ANVESHANA'S INTERNATIONAL JOURNAL OF RESEARCH IN ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES, 2018.