

# **PROPOSTA DE ELIMINAÇÃO DA OPERAÇÃO DE REBARBAÇÃO ELETROQUÍMICA DO PROCESSO DE USINAGEM DE CORPOS DE INJETORES DIESEL**

**Emanuelli Dering, emanuelli.dering@gmail.com**

**Leonardo de Lara, leonardodelara95@gmail.com**

**Orientador: Daniela Wollmann, daniela.wollmann@up.edu.br**

***Resumo:** Visando o aumento da capacidade produtiva e redução de custo, este estudo consiste em propor e avaliar a viabilidade da eliminação da etapa de rebarbação eletroquímica durante o processo de usinagem de uma peça utilizada no sistema de injeção diesel. A validação desta proposta será feita através de testes de pulsação em alta pressão para avaliar a resistência à fadiga de um componente modificado, simulações e cálculos dos indicadores de produção, tais como custo, tempo de agregação de valor, material indireto e setup. Com a implementação em prática, chegou-se a redução da rebarbação nos pontos de baixa pressão dos injetores, com redução do tempo de ciclo e setup mantendo a performance e qualidade do injetor.*

***Palavras-chave:** Rebarbação eletroquímica, injetores diesel, usinagem*

## **1 INTRODUÇÃO**

O Mercado de reposição da indústria automobilística é entendido como o conjunto de atividades associadas com os produtos (peças de reposição) e com serviços (serviços mecânicos) após a venda deste produto. Conforme Gallagher et al. (2005), o segmento movimenta mais de US\$ 400 bilhões por ano nos EUA, o que torna este mercado muito atrativo, pois a venda desses itens compõe uma parte importante na lucratividade das empresas que atuam nesse segmento. De acordo com os dados de agosto de 2020 do RNTRC (Registro Nacional do Transporte Rodoviário de Cargas) da ANTT (Agência Nacional do Transporte Terrestre), desconsiderando os veículos de carga própria que não são contemplados em tal registro, a idade média da frota de veículos de carga nacional é de 11,8 anos, dado este que demonstra grandes oportunidades para este mercado no Brasil.

Reduzir custos e aumentar a capacidade produtiva em uma corporação é essencial para manter a competitividade e sustentabilidade dentro de sua área de atuação. Analisando o fato de que o mercado de reposição é voltado para veículos usados e que este público não exige das montadoras os mesmos critérios de vida útil e performance de um produto novo, surge a oportunidade de pensar em otimização do processo produtivo que possam ser revertidas em ganhos para a empresa, sem deixar de atender as expectativas e exigências do cliente.

Dentro de um sistema de injeção *common rail*, onde existe o circuito eletrônico de injeção de combustível para o motor, diversos componentes são destinados a esse mercado de reposição. Dentre esses componentes, o corpo do injetor é um dos itens com maior número de operações em seu processo de fabricação, sobretudo processo de usinagem convencional e não convencional. Neste trabalho, será proposto a eliminação de um processo de rebarbação dos canais internos do corpo injetor, que são responsáveis pela passagem do combustível em alta pressão dentro do sistema. Dessa forma diminuindo custo de fabricação e possibilitando o aumento de capacidade da fábrica e realizando testes de engenharia garantindo a qualidade e performance do componente.

### **1.1 Definição e importância do problema**

Dentro da organização, usinagem não convencional é um custo considerável, visto a sua complexidade de ajustes, material químico, manutenção e garantias de qualidade do processo. Neste ponto da usinagem, foi observado que a rebarbação realiza um arredondamento para diminuir cantos concentradores de tensão no sistema de injeção do combustível para o motor. Estudos preliminares mostram que o material utilizado pode garantir a pressão exigida durante a aplicação do injetor no sistema de injeção do motor, sem a necessidade de arredondamentos nos pontos de alta pressão de

combustível que são manufaturados pelos processos de rebarbação, se adequando com novas tecnologias de usinagem convencional.

Em uma empresa de grande porte existe uma competitividade interna, onde volumes de produção são realocados para regiões com melhor custo do produto, levando em conta, mão de obra, tecnologia, localidade e mercado. Atualmente, com uma competitividade internacional bem grande, o Brasil sai atrás de países como China e Índia, considerando custos de mão de obra, custo logísticos e custo com importação conforme o cenário da empresa. Para reverter esse cenário e garantir emprego digno e crescimento econômico, conforme o Objetivo de desenvolvimento sustentável (ODS) 8 da ONU, se faz necessário o desenvolvimento de novas tecnologias, engenharias reversas, adequação de produto conforme a necessidade do cliente, tornando o produto mais viável para venda e fabricação.

## 1.2 Objetivos do trabalho

O objetivo geral deste trabalho é a eliminação da rebarbação eletroquímica em um processo de usinagem de um componente dos injetores para motores diesel com injeção *common rail*.

Com este estudo pretende-se analisar e validar a performance do “corpo” do injetor sem a aplicação da rebarbação eletroquímica, por meio de teste de pulsação de alta pressão, e após validado propor a melhoria para empresa, calcular os ganhos da otimização garantindo um produto com custo e qualidade compatíveis com o exigido pelo mercado de reposição.

## 1.3 Estrutura do trabalho

O capítulo seguinte apresenta o referencial teórico dos temas em que o trabalho foi embasado, bem como as ferramentas utilizadas para o seu planejamento. O capítulo 3 relata a metodologia aplicada no decorrer do trabalho e na sequência, no capítulo 4 os resultados encontrados na pesquisa, e por fim, o capítulo 5 consta com uma retomada dos objetivos propostos, de modo a demonstrar como os mesmos foram atingidos.

# 2 REFERENCIAL TEÓRICO

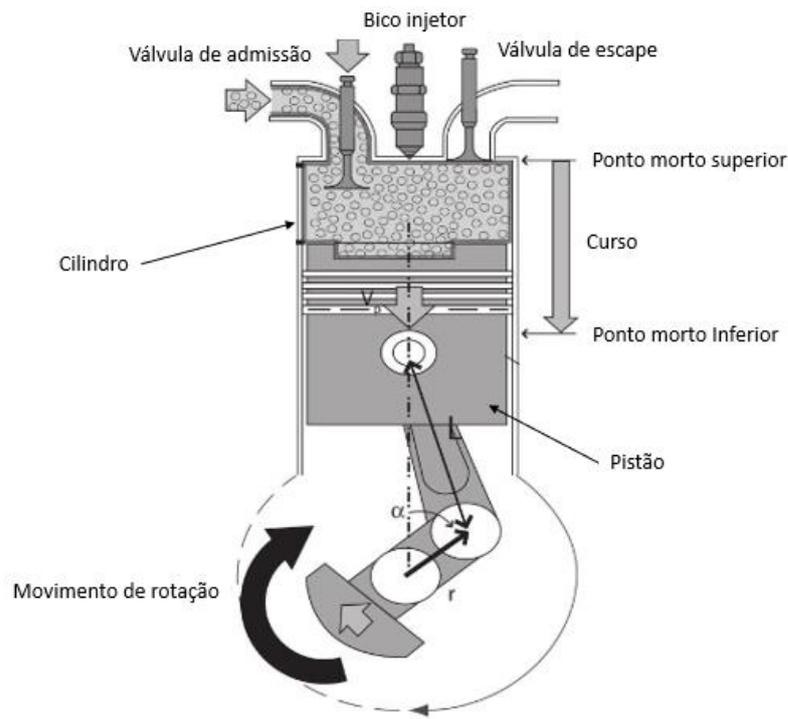
## 2.1 Combustão interna

Através da queima de combustível é possível transformar calor em trabalho, isso significa a transformação de energia química em trabalho mecânico. Segundo Brunetti (2018), os motores podem ser classificados em combustão externa, como por exemplo os sistemas que utilizam o ciclo Rankine e em combustão interna quando um fluido tem uma participação direta da queima. Conforme citado por Heywood (1988) a combustão interna teve seu início no ano de 1876 quando Otto desenvolveu o motor de ignição pela primeira vez e em 1892 quando Diesel inventou a ignição por compressão do motor. De acordo com Moran e Shapiro (2006) no ciclo de Otto, a mistura de ar e combustível é acionada pela ignição por centelha e no ciclo Diesel, o ar é comprimido em alta pressão e alta temperatura junto com o combustível injetado.

Para Canciano (2004) combustão é definida como o conjunto de reações químicas que se desenvolvem de forma relativamente rápida, de caráter exotérmico, podendo apresentar ou não manifestações do tipo de radiações visíveis, em fase gasosa ou heterogênea e sem exigir necessariamente a presença de oxigênio. No funcionamento do motor a combustão, o pistão se move para trás e para frente em um cilindro, transmitindo energia para a biela e dando movimento ao eixo do motor. Na figura abaixo podemos ver um esquema de motor com combustão interna.

De acordo com Moran e Shapiro (2006) no ciclo de funcionamento de um motor diesel, existe o ciclo de admissão, que ocorre quando o ar é jogado para dentro do cilindro através da válvula, no segundo momento ocorre a compressão, onde o pistão sobe e comprime o ar no interior no cilindro e na terceira etapa o combustível é injetado, com a alta temperatura ocorre o movimento e a expulsão dos gases pela válvula. Na figura 1 é representado como funciona um motor a diesel e seus componentes.

Figura 1. Representação do motor de combustão interna.



Fonte: Adaptado de Brunetti (2018)

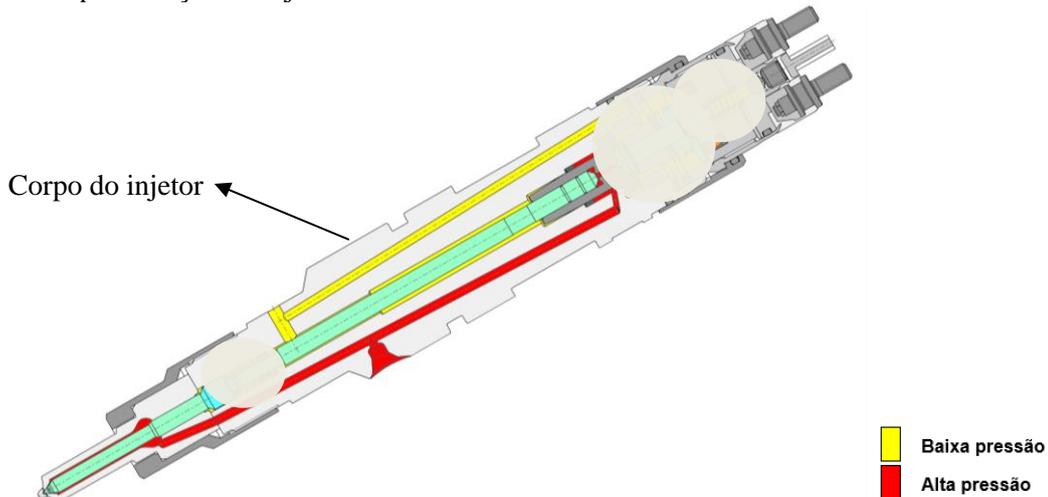
## 2.2 Sistema de injeção *Common Rail*

Conforme Bosch (2005) o sistema de injeção de combustível *common rail*, é um sistema de baixo consumo de combustível com redução das emissões de gases e motores mais silenciosos entregando grandes torques para trabalho. Neste sistema o combustível é entregue continuamente em alta pressão para dentro do motor. Dentre as vantagens desse sistema, é notório a junção de altas pressões de trabalhos obtidas com as múltiplas injeções, como, por exemplo, a pré injeção, injeção principal, e pós injeção. De acordo com Brunetti (2018) o sistema é comandado por uma unidade eletrônica que pode acionar separadamente cada injetor, além disso, a pressão de injeção também é controlada por essa unidade possibilitando o trabalho do motor em alta pressão mesmo em baixas rotações.

De acordo Bosch (2005) o sistema de injeção consiste em 3 grandes grupos dentro do conjunto, o processo com baixa pressão no qual está o sistema de alimentação do combustível que alimenta o segundo grupo onde é encontrado os tubos de alta pressão e injetores, e, por fim, as unidades de controles, onde estão os módulos, sensores e atuadores que controlam o sistema. Os principais componentes do sistema *common rail* são:

- 1) Bomba CP: A bomba que recebe o óleo diesel de baixa pressão, comprimindo e jogando para o sistema em alta pressão.
- 2) Trilho, Rail ou acumulador de pressão: O tubo forjado que realiza a distribuição do óleo pressurizado para os injetores, contendo uma válvula de segurança e sensor de pressão.
- 3) Módulo eletrônico: Com bases nos mapas e dados dos sensores presente no sistema e programas, define a quantidade injetada no sistema.
- 4) Injetores Diesel: Os injetores são os receptores do diesel em alta pressão do trilho e injetam para dentro da câmara do motor para acontecer a combustão. Assim que liberado o sinal pelo módulo eletrônico, o solenóide é acionado em cada injetor, podemos acontecer a injeção em várias fases, pelo fato de o combustível já estar pressurizado no trilho. Dentro do corpo injetor existe áreas de alta e baixa pressão conforme apresentado na figura 2. Essa flexibilidade de injeção é muito importante para diminuir taxas de ruídos, otimização da combustão e redução de emissões de gases.

Figura 2. Representação do injetor *common rail*



Fonte: Adaptado de Bosch (2005)

No funcionamento do injetor do sistema *common rail*, podemos separar no momento em que o injetor está fechado e não existe a injeção para o motor, e o momento após a energização da bobina magnética, onde a força eletromagnética vence uma força de mola e puxa um conjunto no interior do injetor, desobstruindo um pequeno furo dentro de uns dos componentes e assim a fuga do óleo pressurizado, realizando a abertura do bico e a injeção do combustível pulverizado. Após esse ciclo, encerra a corrente e o injetor é fechado novamente.

### 2.3 Processo de usinagem convencional

Conforme Casarin (2018) o processo de usinagem, que consiste em método de fabricação através da remoção de material, pode ser classificado por processos de usinagem convencional e usinagem não convencional, essa classificação é observada na figura 3. Ainda, dentro da usinagem existem ferramentas de geometria definida utilizadas em processos de torneamento, furação, fresamento, etc. e as ferramentas de geometria de corte indefinida, aplicadas em operações de retificação, brunimento, jateamento e etc.

Figura 3. Classificação dos tipos de usinagem.



Fonte: Casarin (2018)

Conforme Fracaro (2017) o processo de torneamento tem a função de dar forma à peça a partir da rotação dela com uma velocidade definida de acordo com seu diâmetro, material e ferramenta a ser utilizada. No torneamento convencional, o operador tem a função de realizar os movimentos em relação

aos eixos X e Z da porta ferramenta, com a peça em rotação, presa na castanha e ligada ao motor da máquina. No processo de torneamento com comando numérico computadorizado (CNC) a máquina, a partir de uma programação, realiza todos os movimentos desejados para a fabricação da peça. Dentro do torneamento, vários formatos podem ser obtidos na peça. Dentro do processo de torneamento, também é possível realizar furação interna, utilizando ferramentas definidas como brocas.

De acordo com Machado (2015) no processo de fresamento, a usinagem ocorre e a peça é presa na máquina e o material é removido por meio de ferramenta multicortante em movimento uniforme. O deslocamento para a usinagem pode ser tanto da peça, da ferramenta ou até mesmo do movimento conjunto da peça e da ferramenta. No fresamento pode-se realizar vários tipos de formas como furações e usinagem mais complexas, como, por exemplo, engrenagens.

Conforme verificado por Fracaro (2017) no processo de usinagem a ferramenta é muito importante para obtenção do processo. A forma e a dimensão da ferramenta de corte definem o desempenho do processo, e a escolha correta da ferramenta é a parte essencial do processo as ferramentas de cortes estão normalizadas nacionalmente e internacionalmente, as normas mais conhecidas são a DIN 6581, a ISO3002-1 e a Brasileira ABNT.

## 2.4 Usinagem Eletroquímica

De acordo com Malshe et al. (2013), a usinagem eletroquímica (ECM - *electrochemical machining*) é um processo de usinagem não convencional no qual o material é removido por mecanismos de dissolução anódica durante o processo de eletrólise, onde a peça a ser usinada funciona como anodo e a ferramenta como catodo. Um fluido eletrolítico é bombeado entre a ferramenta e a peça e é aplicada uma corrente direta com baixa voltagem através da célula eletrolítica, para dissolver o material da peça. Devido às suas características a usinagem eletroquímica é aplicada em diversos bens produzidos pela indústria, incluindo lâminas de turbina, peças fundidas de motor, gaiolas de rolamento, engrenagens, matrizes e moldes e implantes cirúrgicos.

Conforme citado pelos estudos da University of Nebraska–Lincoln, os primeiros desenvolvimentos significativos da tecnologia ECM ocorreram nos anos 1950, quando a Anocut Engineering Company estabeleceu a técnica de usinagem de metal anódico como uma técnica de usinagem comercialmente possível. A partir de 1990 o processo ECM já surge na indústria como meio de usinagem utilizado em diversos setores, como por exemplo, o setor automotivo, petrolífero, engenharia médica, bem como por empresas aeroespaciais, que atualmente são os seus principais usuários.

Silva (2018, apud Kozak 1992, p. 14), declara que as principais características do processo de usinagem eletroquímica são:

- A dureza ou as propriedades mecânicas do material a ser utilizado não são fatores que prejudicam a taxa de remoção do material, pois o material não é removido através de métodos mecânicos e sim por dissolução anódica.
- A precisão do processo de usinagem eletroquímica depende das dimensões e da forma da peça a ser usinada, contudo no uso de corrente contínua estará aproximadamente entre 0,05 mm a 0,3 mm e de 0,02 mm a 0,05 mm no uso de corrente pulsante;
- O acabamento superficial obtém valores de rugosidade decrescentes de acordo com a taxa de remoção de material. Os resultados atingidos ficam aproximadamente entre 100 e 250  $\mu\text{m}$ ;
- A ECM não gera tensões residuais no material da peça;
- Dependendo da tensão e das propriedades eletroquímicas do material da peça usinada, o processo ECM apresenta um consumo de energia relativamente elevado e fica entre 200 a 600  $\text{J}/\text{mm}^3$ ;
- Eliminação da deflexão da ferramenta em situações que exigem elevadas razões comprimento/diâmetro de cortes ou nos casos em que características da peça requerem agudos ângulos de abordagem da ferramenta. Isso ocorre porque na ECM a ferramenta não entra em contato físico direto com a peça e, devido a isso, não há forças que podem retirar a ferramenta da posição a ser usinada.

Conforme apontado pelo estudo de Martins da Silva (2011), a usinagem eletroquímica é uma tecnologia relativamente nova e possui grande aplicação nos processos de usinagem de peças de alta resistência a cisalhamento e/ou de grande dureza. É ressaltado também que esse processo não possui contato direto na interface peça-ferramenta, o que contribuiu para a não geração de calor e atrito, bem como, a preservação das características físicas da peça e do eletrodo (ferramenta) que praticamente não apresenta desgaste.

Segundo Pandey e Shan (1985) existem diversos tipos e tamanhos de máquinas de usinagem eletroquímica as quais possuem diferentes tipos de sistemas de carregamento das peças, setup, alinhamento entre trabalho, ferramentas e métodos de controle. Uma máquina ECM típica pode ter uma mesa para abastecimento de trabalho e um dispositivo de fixação para a montagem da ferramenta. Máquinas ECM modernas são equipadas com um sistema de acionamento especial que garante movimentos lentos e precisos da ferramenta, bem como com os meios para lidar com altas correntes com segurança. Elas também são revestidas com materiais não corrosivos para proteção contra as ações corrosivas dos eletrólitos.

## **2.5 Materiais**

Para Callister (2002) o desenvolvimento de muitas tecnologias de hoje em dia, está totalmente ligada ao estudo dos materiais e o avanço dele é precursor para o avanço da tecnologia. Baseando-se na composição química e estrutura atômica, os materiais são agrupados em três classes: metais, cerâmicos e polímeros. Os metais são resistentes e deformáveis, resistente a fraturas: alta tenacidade, são sensíveis à corrosão e são bons condutores de calor e eletricidade. Os materiais cerâmicos são de alta dureza, porém frágeis, eles também são resistentes à corrosão, leves, duráveis, geralmente isolantes de calor e eletricidade e resistentes a altas temperaturas. Já os polímeros são compostos orgânicos baseados em carbono, hidrogênio e outros elementos não-metálicos, são constituídos de moléculas muito grandes (macromoléculas), possuem baixa resistência à deformação (podem ser extremamente flexíveis), são sensíveis a altas temperaturas e em geral, maus condutores de eletricidade, podem ser divididos em termoplásticos e termofixos.

Conforme Callister (2002) o comportamento mecânico do material reflete a resposta obtida a partir de uma força aplicada. Propriedades como resistência, dureza, ductilidade e rigidez de uma peça são essenciais para avaliar o comportamento dela a partir de um esforço aplicado, sendo de tração, compressão, cisalhamento, flexão e/ou torção. O comportamento elástico se diz a respeito da capacidade do material em ser deformado e voltar ao estado original, já o comportamento plástico ocorre quando o material é submetido a um esforço e ultrapassa o limite elástico, assim o material sofre uma deformação permanente. A ductilidade é a capacidade de um material deformar-se plasticamente até a ruptura e o material que rompe sem sofrer uma quantidade significativa de esforço no regime plástico é considerado frágil. A energia mecânica necessária para a ruptura de um material é conhecida como tenacidade e a resiliência é a capacidade que o material tem em absorver o trabalho no regime elástico. A dureza é uma outra propriedade importante para ser considerada, ela se trata da medida da resistência de um material a uma deformação plástica localizada, como um risco ou uma impressão.

## **2.6 Indicadores de desempenho**

Para Navarro (2006 apud Souza et al. 1994, p. 22), um indicador de desempenho tem como definição um resultado atingido em determinado processo ou em características dos produtos finais resultantes. Os indicadores de desempenho são expressões quantitativas que representam uma informação gerada a partir da aferição e avaliação de uma estrutura de produção, dos processos que a compõem e dos produtos resultantes, e refletem o comportamento do processo ou produto em relação a determinadas variáveis tais como custo, lucro, retrabalho, conformidades de produto, etc.

De acordo com Peinado e Graeml (2007), o sistema de custos de uma organização é significativo para o planejamento e controle das atividades da mesma e auxilia na decisão do modo de fabricar, na melhoria dos processos e na eliminação de desperdícios. Portanto, a análise dos indicadores de custos x lucro x volume é muito utilizada nas corporações e permite estudar os relacionamentos que acontecem entre os custos incorridos, o volume de produção e o lucro em um determinado período.

Outro indicador importante a ser considerado é o tempo de ciclo, que é definido por Alvarez e Antunes (2001) como o período transcorrido entre a repetição de um mesmo evento que caracteriza o início ou fim desse ciclo. Em um sistema de produção, o tempo de ciclo é determinado pelas condições operativas da célula ou linha. Exemplificando este conceito para uma máquina ou equipamento, o tempo de ciclo é o tempo necessário para a execução do trabalho em uma peça; é o tempo transcorrido entre o início/término da produção de duas peças sucessivas de um mesmo modelo em condições de abastecimento constante. Cada máquina e equipamento tem um tempo de ciclo característico para cada operação (processamento) executada.

Um terceiro indicador a ser considerado é a capacidade de produção. Para Peinado e Graeml (2007) uma definição genérica de capacidade de produção é a capacidade máxima de produção a que se pode submeter uma unidade produtiva em um determinado intervalo de tempo fixo. As informações a respeito da capacidade são de fundamental importância e imprescindíveis para todos os níveis da organização: estratégico, tático e operacional. Peinado e Graeml (2007) classificam os tipos de capacidade da seguinte forma:

- A capacidade instalada consiste no volume máximo que uma unidade produtora pode alcançar, sem nenhuma perda, trabalhando em regime *full time*. É uma medida hipotética, a ser utilizada para definições estratégicas.
- A capacidade disponível corresponde ao volume produzido em uma unidade produtiva no período correspondente à jornada de trabalho, sem considerar nenhuma perda.
- Capacidade efetiva corresponde à capacidade disponível considerando-se as perdas planejadas.
- Capacidade realizada inclui-se também as perdas não planejadas.

## ***2.7 Mapeamento de fluxo de valor e Projeto de fluxo de valor***

De acordo com Nascimento et. al. (2009), o mapeamento de fluxo de valor, ou *value stream mapping* (VSM) é uma ferramenta utilizada no Sistema Toyota de Produção para mapear o fluxo de materiais e informações do começo ao fim do processo, não focando em pequenas partes ou departamentos da empresa, mas olhando o todo e enxergando as inter-relações de cada setor visando o atendimento ao cliente, ou seja, a ferramenta serve para ter a visão geral do processo, desde o momento que ocorre o input de informação das necessidades do cliente, até a informação aos fornecedores de matéria-prima, passando por como as ordens de produção são informadas à fábrica até a saída do produto final. Esta maneira de enxergar o negócio será o ponto de partida para a programação das melhorias ou desenvolvimento de novos processos.

Conforme observado por Santos et al. (2011) uma das vantagens do VSM é que a ferramenta reúne técnicas enxutas em torno de uma linguagem comum e, dessa forma, evita que a implantação da manufatura enxuta ocorra por meio de ferramentas isoladas que, sozinhas, têm um potencial limitado de melhoria do fluxo de valor. Santos et al. (2011) também cita que a simbologia utilizada no mapeamento de fluxo de valor foi desenvolvida de forma a facilitar a identificação dos desperdícios, bem como suas fontes, o que reforça a contribuição da ferramenta para atingir as metas da produção enxuta.

Conforme citado por Roman et al. (2013, apud Rother e Shook 2003, p. 6), algumas características essenciais da ferramenta mapeamento do fluxo de valor são:

- É possível enxergar o fluxo como um todo, ajuda a visualizar mais do que simplesmente os processos individuais, por exemplo, montagem, solda, etc.;
- Auxilia a identificar mais do que os desperdícios. Mapear ajuda a identificar as fontes de desperdícios no fluxo de valor;
- Fornece uma linguagem comum para tratar os processos de manufatura;
- Torna as decisões sobre os fluxos visíveis, de modo que possa discuti-las. De outro modo, muitos detalhes e decisões no chão de fábrica só acontecem por omissão;
- Junta conceitos e técnicas enxutas, que o ajuda a evitar a implementação de algumas técnicas isoladamente;
- Forma a base de um plano de implementação. Ao ajudá-lo a desenhar como o fluxo total de porta a porta deveria operar – uma parte que falta em muitos esforços enxutos – os mapas do fluxo de valor tornam-se referência para a implementação enxuta. Imagine tentar construir uma casa sem uma planta;

- Mostra a relação entre o fluxo de informação e o fluxo de material. Nenhuma outra ferramenta faz isso;

Conforme apontado por Nascimento et al. (2009), após o mapeamento do estado atual, é observado as oportunidades de melhorias e se começa a montar um mapa com essas melhorias implementadas, ou seja, Projeto de Fluxo de Valor (ou *Value Stream Design* - VSD). No VSD deve-se primar pelo fluxo de material, redução de desperdícios e lead time, ele será o guia gerencial de todo o processo de transformação enxuta e nele pode-se acompanhar, conduzir os eventos de melhoria contínua e observar se eles estão condizentes com o programado no mapeamento. A ferramenta VSD pode ser confundida com um mapa futuro de um VSM, no entanto deve-se ter claro que há objetivos diferentes, com horizontes de tempo diferentes. O VSD deve ser um objetivo a longo prazo, mas com um plano de ações concreto e realizável e pode ser utilizado como ferramenta de planejamento para projetos.

De acordo com Kannengiesser (2014) o projeto do fluxo de valor é geralmente visto como um processo de quatro etapas:

- Etapa 1: Identificar uma família de produtos em que as variantes individuais do produto compartilham as mesmas etapas de produção ou semelhantes.
- Etapa 2: Criar o mapa do estado atual, ou seja, um diagrama que mostra o fluxo de valor incluindo parâmetros-chave e métricas/indicadores do processo, como por exemplo, a eficácia geral do equipamento (OEE) e *lead time* total.
- Etapa 3: Identificar o potencial de melhoria e criar um mapa do estado futuro que visualiza um fluxo de valor redesenhado.
- Etapa 4: Preparar um plano de trabalho para implementar as mudanças projetadas no fluxo de valor.

### 3 METODOLOGIA

A primeira parte do projeto consistiu em realizar um mapeamento do cenário atual de todo processo de usinagem por meio da ferramenta VSM. O objetivo deste mapeamento inicial foi coletar e observar os indicadores deste processo, sobretudo o tempo de agregação de valor na etapa de rebarbação eletroquímica que é o foco deste estudo, a fim de calcular os ganhos com a eliminação deste processo produtivo.

Na segunda etapa, foi realizado a produção de amostras de um determinado corpo do injetor, destinado ao mercado de reposição, sem a execução da operação de rebarbação eletroquímica. Em seguida, elas passaram por um teste de pulsação de alta pressão, conforme parâmetros descritos em prescrição interna da empresa, que consiste basicamente em simular o funcionamento do injetor operando nas condições de carga plena dentro do motor por 500 horas, a fim de analisar se as regiões de alta pressão que foram modificadas e aumentadas sem a efetiva retirada de material nas intersecções dos furos internos irão sofrer fadiga.

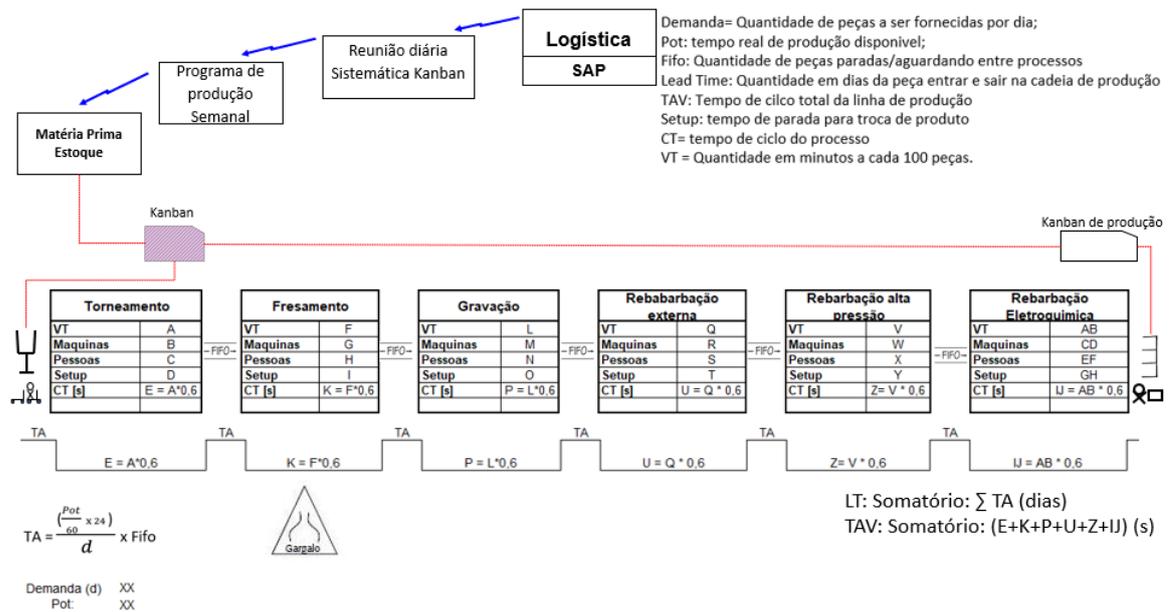
Para a aprovação do teste foi esperado que todas as peças da amostra apresentem resultados semelhantes sem dispersão e que não ocorresse nenhum dano na estrutura dos corpos injetores, podendo ser comparado com os resultados dos testes dos produtos em série já realizados periodicamente pela empresa.

Após análise dos dados e a constatação da reprovação do primeiro teste, foi avaliado uma nova estratégia para a otimização da operação de rebarbação, a fim de garantir qualidade para a peça ser aprovada nos testes de performance sem a operação estudada. Na etapa final, foi fabricado um segundo lote de amostras, conforme os critérios definidos de acordo com a nova estratégia. E, em seguida, foi realizado um novo teste de pulsação por alta pressão seguindo os mesmos parâmetros do teste inicial, a fim de avaliar o comportamento da nova amostra.

### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No mapeamento do estado atual, conforme figura 4, é observado o fluxo de trabalho, bem como todo o tempo de cada etapa e a forma como são calculados os indicadores dentro do mapeamento. Os valores coletados no mapeamento estão representados como letras na figura 4 pelo fato de serem dados sigilosos da empresa.

Figura 4. Mapeamento de fluxo de valor do estado atual do processo analisado

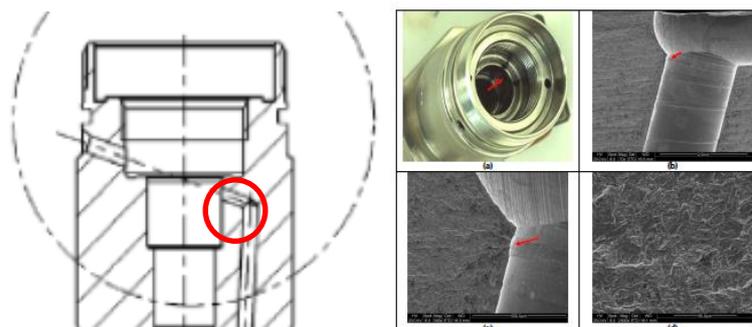


Fonte: Os autores (2021)

No período planejado, foram realizadas 32 amostras para estudo preliminar sem rebarbação. Neste teste, foram utilizados os mesmos parâmetros de usinagem na operação de torneamento, fresamento e rebarbação de alta pressão (solução de água com óleo) conforme o processo atual de produção, porém sem a realização da rebarbação eletroquímica, a fim de analisar a resistência à fadiga das peças através do teste de pulsação por alta pressão. As amostras são constituídas de um material com dureza aproximada de 40 HRC e o óleo utilizado para o teste de alta pressão foi o óleo hidráulico Renolin MR15 ISO VG46. Para a aprovação do projeto é necessário um resultado de quebra do componente acima de 1600 bar conforme prescrição do produto.

O estudo preliminar das 32 amostras sem a rebarbação eletroquímica, indicou aprovação para regiões denominadas de baixa pressão. Entretanto, dentre as peças testadas, foi observado a quebra de 6 amostras na região de alta pressão do corpo injetor, com valores abaixo do especificado e com resistência à fadiga de 1500 bar. Todas as amostras apresentaram trinca na mesma área e mostraram fratura se propagando por fadiga na região de falha de usinagem, onde de acordo com o processo atual deveria passar pela rebarbação eletroquímica, essa fratura pode ser observada na figura 5. Essa fratura ocorreu devido o ponto ser um concentrador de tensão, onde a não rebarbação eletroquímica gerou uma área maior, aumentando a tensão neste ponto. Dentro da análise das 32 amostras, foi observado também uma grande dispersão dos resultados, assim o resultado preliminar foi concluído como reprovado para as regiões de alta pressão do injetor.

Figura 5. Desenho esquemático do corpo injetor e detalhe do local da trinca na amostra



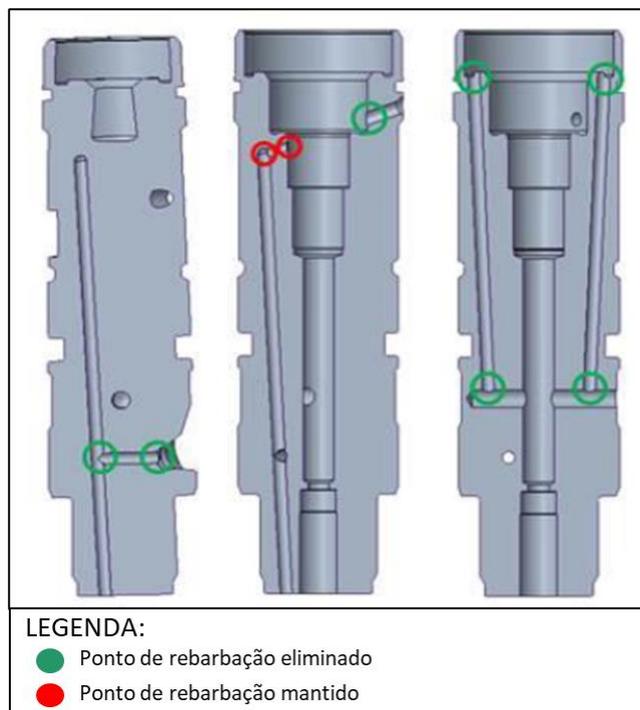
Fonte: Os autores e adaptado da empresa (2021)

Para que a melhoria do processo fosse aprovada também na região de alta pressão do corpo injetor, o resultado preliminar mostra a necessidade de adequação do fresamento, processo no qual são feitas as furações internas do corpo injetor e que é uma das etapas anteriores à usinagem eletroquímica, visando maior arredondamento dos cantos onde durante os testes de pulsação de alta pressão apresentou fadiga em pontos concentradores de tensão. Para isso seria necessário desenvolver novos parâmetros de corte, novas ferramentas e entre outros parâmetros de usinagem convencional. Entretanto, a adequação desta etapa de usinagem conduziria a um aumento do ciclo de máquina, e um maior custo com ferramental de usinagem convencional.

Com os resultados preliminares aprovados na região de baixa pressão e a inviabilidade da adequação da operação de fresamento, o estudo concentrou-se na eliminação de pontos da rebarbação eletroquímica apenas na região de baixa pressão, assim garantindo a redução parcial do atual lead time, do tempo de setup e consequentemente do custo do produto. Para validação desta proposta, foi produzido mais um lote amostral para passar pelo teste de pulsação por alta pressão. Este lote foi fabricado sem a rebarbação eletroquímica nos pontos de baixa pressão e a rebarbação foi mantida nos pontos que mostram falha quando performados nos primeiros testes.

Para a realização do segundo teste, foram mantidos os parâmetros de usinagem convencional e fluxo do processo anteriores à rebarbação. As novas amostras passaram em apenas algumas das etapas de rebarbação eletroquímica para que apenas os furos da região de alta pressão fossem rebarbados. Conforme representado no desenho esquemático da Figura 6, os pontos indicados com cor verde não receberam a rebarbação eletroquímica, já os pontos em vermelho tiveram a rebarbação mantida de acordo com os parâmetros atuais do processo. Após a usinagem das amostras, as peças foram encaminhadas para o teste de pulsação por alta pressão de acordo com as especificações e prescrições internas de teste da empresa.

Figura 6. Desenho esquemático dos pontos de rebarbação do corpo injetor



Fonte: Os autores (2021)

O processo proposto apresentou resultados positivos no teste de validação e foi aprovado, eliminando em 77,78% os pontos de usinagem da operação de rebarbação eletroquímica e uma redução de 50% do tempo de setup para o componente avaliado. Mesmo em regiões onde foram mantidos os pontos concentradores de tensão, a pressão máxima atingida, não foi capaz de propagar trincas, mantendo a eficiência e funcionalidade do produto. Visando projetar a vida útil da peça, o teste foi

conduzido até a obtenção das trincas que ocorreu apenas ao ultrapassar 68% dos limites de pressão no produto. Com este resultado, a operação de rebarbação pode ser parcialmente eliminada mantendo o produto funcional sem oferecer riscos ao cliente, porém com uma vida útil reduzida, fato este que não é considerado um problema pois conforme mencionado neste estudo, estes injetores são destinados ao mercado de reposição e não exigem uma vida útil tão duradoura quanto de injetores destinados motores 0 km.

## 5 CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

Reduzir custos e aumentar a capacidade produtiva em uma empresa multinacional é essencial para manter a competitividade e sustentabilidade interna, visto que volumes de produção são realocados para as plantas produtivas com melhor custo do produto. Para contribuir com o cenário competitivo de uma indústria automobilística da região de Curitiba e garantir emprego digno e crescimento econômico, conforme ODS 8, este estudo visou propor a eliminação da etapa de rebarbação eletroquímica durante o processo de usinagem de um determinado corpo utilizado na fabricação de injetores diesel de sistema *common rail*.

O objetivo do estudo foi analisar e validar a performance do corpo do injetor sem a aplicação da operação de rebarbação eletroquímica, por meio de teste de pulsação de alta pressão, e após validado redesenhar o fluxo do produto na linha de produção, mudar parâmetros e documentação do processo garantindo um produto com custo e qualidade compatíveis com o exigido pelo mercado de reposição.

Para a validação deste processo, foi fabricado uma primeira amostra de injetores conforme o processo atual de produção, porém com a eliminação total da operação de rebarbação eletroquímica, que foi encaminhada para o teste de pulsação por alta pressão. Após os testes preliminares notou-se que os corpos apresentaram fadiga e trinca na região considerada de alta pressão. Visto esse resultado e a inviabilidade da adequação da operação de fresamento, o estudo concentrou-se em manter a rebarbação nestes pontos e eliminar os pontos da rebarbação eletroquímica apenas na região de baixa pressão.

Para confirmação desta proposta, foi fabricado um segundo lote de amostras. Este lote foi fabricado mantendo os parâmetros de usinagem convencional e fluxo do processo anteriores à rebarbação. Na operação de rebarbação eletroquímica, as amostras passaram por apenas algumas das etapas de rebarbação para que apenas os furos da região de alta pressão fossem rebarbados. Esta amostra apresentou resultados positivos no teste de validação e foi aprovada, eliminando em 77,78% os pontos de usinagem da operação de rebarbação eletroquímica. Mesmo em regiões onde foram mantidos os pontos concentradores de tensão, a pressão máxima atingida, não foi capaz de propagar trincas, mantendo a eficiência e funcionalidade do produto. Com este resultado, a operação de rebarbação pode ser parcialmente eliminada mantendo o produto funcional.

Um ponto de grande relevância para o funcionamento do produto é a questão de impurezas que podem ficar alojadas nos componentes durante a montagem do injetor e que podem trazer impactos negativos a qualidade dele para o cliente, como por exemplo, emissões, travamento, queima irregular etc. Como sugestão de trabalhos futuros, sugere-se a realização de estudo para avaliar o impacto da eliminação da rebarbação eletroquímica quanto a este tópico.

## REFERÊNCIAS:

ALVAREZ, Roberto Dos Reis; ANTUNES JR, José Antonio Valle. **Takt-time: conceitos e contextualização dentro do sistema toyota de produção** 2001

BOSCH. **Diesel fuel-injector system common rail**, 2005.

CALLISTER, William D, JR. **Ciência e Engenharia de materiais: Uma introdução**. v. 5, 2002

FRACARO, Janaina. **Fabricação pelo processo de usinagem e meios de controle**. 2017

BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna**. V. 1 e 2, 2018

GALLAGHER, Tim, et al. **Profiting from spare parts**. The McKinsey Quarterly, v. 2, p. 1-4, 2005.

HEYWOOD, John. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. 1988.

KANNENGIESSER, Udo **Supporting Value Stream Design Using S-BPM**. International Conference on Subject-Oriented Business Process Management S-BPM ONE 2014: S-BPM ONE - Scientific Research pp 151-160.

MACHADO, Álisson Rocha et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. V.2, 2015

MORAN, Michel; SHAPIRO, Howard. **Princípios da termodinâmica para Engenharia**. ed. 05, 2006.

NASCIMENTO, Luiz Alcides et al. **Aplicação da ferramenta “value stream design” (vsd) no projeto de uma fábrica enxuta**, outubro de 2009, XXIX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

NAVARRO, Gustavo Predroso. **Proposta de sistema de indicadores de desempenho para a gestão da produção em empreendimentos de edificações residenciais**. 2005. 163f. Trabalho de conclusão (Mestrado em engenharia) - Curso de mestrado profissionalizante em engenharia, Escola de engenharia, UFRGS, Porto Alegre, 2006

PANDEY, P.C. and SHAN, H.S., 1985, **Modern Machining Processes**, Tata McGrawHill.

PEINADO, Jurandir; GRAEML, Alexandre Reis. **Administração da Produção (Operações Industriais e de Serviços)**, Centro universitário Positivo - Unicemp, 2007

ROMAN, Darlan José et al. **Lean service: aplicação do mapeamento do fluxo de valor em uma organização de serviços**, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC – Florianópolis – Brasil, revista Gestão Industrial 2013.

SANTOS, Luciano Costa; GOHR, Cláudia Fabiana; SANTOS, Eder Jonis dos **aplicação do mapeamento do fluxo de valor para a implantação da produção enxuta na fabricação de fios de cobre**, Universidade Federal da Paraíba – UFPB – João Pessoa/PB – Brasil, Revista Gestão industrial, 2011.

SILVA, Anderson Martins da 2011 - **Análise do processo de usinagem eletroquímica** <<https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/bitstream/handle/123456789/808/Microsoft%20Word%20-%20TCC%20Anderson%20%28corrigido%2004-02-12%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> acesso em 25 de abril de 2021

SILVA, Gustavo Henrique Guimarães 2018 - **Mapeamento do efeito das variáveis de tensão e tempo de trabalho no processo de usinagem eletroquímica da liga ti-6al-4v** - <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/21058/3/MapeamentoEfeitoVariaveis.pdf> > Acesso em 17 abril de 2021

UNIVERSITY OF NEBRASKA-LINCOLN MATERIALS. Review of Electrochemical and Electrodischarge Machining, 2013 <<https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1275&context=mechengfacpub>> Disponível em: Acesso em 17 abril de 2021