



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA

ALEX MESSIAS
VICTOR PATRICIO DUARTE SOTO

**DESENVOLVIMENTO DE UM FORNECEDOR PARA O CORPO FORJADO
DE UMA BOMBA INJETORA DIESEL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

CURITIBA

2016

ALEX MESSIAS
VICTOR PATRICIO DUARTE SOTO

**DESENVOLVIMENTO DE UM FORNECEDOR PARA O CORPO FORJADO
DE UMA BOMBA INJETORA DIESEL**

Monografia de Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Lupinacci Villanova

Co-orientador: Prof. Dr. Fábio Martins

CURITIBA

2016

TERMO DE ENCAMINHAMENTO

Venho, por meio deste termo, encaminhar para apresentação a Proposta do Projeto Real no ambiente industrial “DESENVOLVIMENTO DE UM FORNECEDOR PARA O CORPO FORJADO DE UMA BOMBA INJETORA DIESEL”, realizada pelos alunos ALEX MESSIAS e VICTOR PATRICIO DUARTE SOTO, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Rodrigo Lupinacci Villanova
UTFPR – Damec
Orientador

Prof. Dr. Fábio Martins
UTFPR – Damec
Co-orientador

Curitiba, 11 de novembro de 2016

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto Real no ambiente industrial "DESENVOLVIMENTO DE UM FORNECEDOR PARA O CORPO FORJADO DE UMA BOMBA INJETORA DIESEL", realizado pelo aluno(s) ALEX MESSIAS e VICTOR PATRICIO DUARTE SOTO, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Rodrigo Lupinacci Villanova
UTFPR – Damec
Orientador

Prof. Dr. Fábio Martins
UTFPR – Damec
Co-orientador

Prof. Dr. Aloisio José Schuitek
UTFPR – Damec
Avaliador

Prof. Dr. Ricardo Fernando dos Reis
UTFPR – Damec
Avaliador

Curitiba, 11 de novembro de 2016

RESUMO

Em razão da desvantajosa dependência da utilização de um único fornecedor, o trabalho tem por objetivo retratar, de forma acadêmica, o desenvolvimento de um fornecedor alternativo de componentes automotivos para a produção de um componente forjado de uma bomba injetora diesel UP. Diante deste quadro e tomando por base a literatura técnica, elaborou-se um processo de fabricação mais enxuto e viável economicamente a ser utilizado pelo fornecedor alternativo. A fim de bem delinear a metodologia empregada, o presente trabalho foi dividido em dois módulos, quais sejam a definição de um novo fornecedor, bem como a implementação do processo de laminação em rolos ao invés do forjamento em matriz aberta. Sequencialmente, o novo fluxo produtivo foi validado técnica e economicamente, por meio da aprovação do PPAP (Processo de Aprovação de Peças de Produção), do teste de pulsação hidráulica de alta pressão e da análise de custos do componente forjado do novo fornecedor. Além de reduzir a dependência entre cliente e fornecedor, o PPAP foi aprovado sem quaisquer restrições e o resultado do teste de pulsação hidráulica de alta pressão, se comparados ao histórico de amostras do Fornecedor A, apresentou uma pressão de trabalho permissível máxima ainda maior.

Palavras chave: Bomba injetora diesel UP, PPAP, Teste de pulsação hidráulica de alta pressão, fornecedor, conformação.

“Algo só é impossível até que alguém duvide e resolva provar ao contrário”

(Albert Einstein)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de geração de pressão para a injeção de combustível.....	16
Figura 2 - Exemplos de sistemas comerciais de distribuidores de pressão: Unit Injector (esquerda) e Unit Pump (direita)	17
Figura 3 - Desenho esquemático do corpo forjado da bomba injetora a diesel.....	18
Figura 4 - Representação do desenho em vista explodida da Unit Pump com seus componentes..	18
Figura 5 - Orientação das fibras da peça após a conformação.....	19
Figura 6 – Representação esquemática das tensões internas sofridas pelo material no processo de forjamento livre	20
Figura 7 - Representação esquemática das tensões internas sofridas pelo material no processo de laminação em rolos.....	22
Figura 8 – Efeito Mannesman	23
Figura 9 - Exemplo de equipamento de ultrassom utilizado na indústria.....	24
Figura 10 - Trinca superficial revelada em um componente forjado a partir do ensaio de partículas magnéticas.....	25
Figura 11 - Equipamento utilizado para executar o ensaio não destrutivo por correntes parasitas ..	26
Figura 12 - Jateamento feito por partículas abrasivas em um componente mecânico Fonte: International Finishing Corporation.....	27
Figura 13 - Aspecto macroscópico de uma ruptura por fadiga, indicando ponto de início e sua propagação	29
Figura 14 - Parâmetros de caracterização do carregamento cíclico.....	30
Figura 15 - Curva de Wöhler delimitada pelas regiões de fadiga de ciclo baixo, de ciclo alto e de vida infinita.....	31
Figura 16 - Fluxograma da metodologia do trabalho.....	35
Figura 17 - Fluxo de processos para a manufatura do corpo da bomba injetora no Fornecedor A ..	37
Figura 18 - Simulação do processo fabricação da pré-forma em rolos laminadores	39
Figura 19 - Pré-forma após passar pelo processo de laminação em rolos	39
Figura 20 - Fluxo de processos para a manufatura do corpo da bomba injetora no Fornecedor B ..	40
Figura 21 - Representação da matriz de forjamento do Fornecedor B com dupla cavidade.....	41
Figura 22 - Desenho esquemático do corpo forjado UP, indicando a região onde foi feito o exame de dureza e a micrografia na peça	44
Figura 23 - Motor ciclo diesel do teste de pulsação hidráulica de alta pressão.....	45
Figura 24 - Equipamento de corte equipamento Struers Labotom 3.....	48
Figura 25 – Indicação do início da fratura do corpo forjado para as amostras 1 e 2	50
Figura 26 - Indicação do início da fratura do corpo forjado para as amostras 3 e 4	51
Figura 27 - Resultado da composição química obtida pelo EDS	53
Figura 28 - Inclusões de MnS da amostra 1	54
Figura 29 - Inclusões de MnS da amostra 2.....	54
Figura 30 - Inclusões de MnS da amostra 3.....	54
Figura 31 - Inclusões de MnS da amostra 4.....	54
Figura 32 - Análise metalográfica da amostra 1.....	55
Figura 33 - Análise metalográfica da amostra 2.....	56
Figura 34 - Seção do corte do componente para a análise do fibramento	56
Figura 35 - Orientação das fibras dos componentes do fornecedor B (esquerda) e do fornecedor A (direita).....	57

Figura 36 - Representação da descarbonetação parcial em relação ao material base.....	58
Figura 37 - Análise descarbonetação parcial.....	59
Figura 38 - Análise descarbonetação parcial.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fases do produto em diferentes etapas da fabricação e montagem.....	38
Tabela 2- Representação das matrizes de forjamento nas etapas 2 e 3 do Fornecedor A.....	40
Tabela 3 - Sequência das etapas dos processos de conformação do Fornecedor B.....	42
Tabela 4 - Composição química do aço SAE 4144	42
Tabela 5 - Fração mássica de elementos em cada uma das amostras analisadas.....	52
Tabela 6 - Resultado da medição de dureza Brinell (HB) em oito amostras.....	58
Tabela 7 - Representação da matriz de documentos requeridos pelo cliente no PPAP, documentos enviados pelo fornecedor e o resultado da avaliação de cada um deles.	61
Tabela 8 – Análise quantitativa do projeto	62

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

AIAG	<i>Automotive Industry Action Group</i> (Grupo de Ação da Indústria Automotiva)
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana de Testes e Materiais)
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> (Instituto Alemão de Padronização)
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> (Espectroscopia Dispersiva de Energia)
FMEA	<i>Failure Mode Effects Analysis</i> (Análise do Modo e Efeito de Falha)
HPPT	<i>High Pressure Pulse Test</i> (Teste de Pulsação de Alta Pressão)
IMDS	<i>International Material Data System</i> (Sistema Internacional de Dados de Materiais)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Padronização)
MP	Matéria prima
PIB	Produto Interno Bruto
PPAP	<i>Production Part Approval Process</i> (Processo de Aprovação de Peça de Produção)
PSW	<i>Part Submission Warrant</i> (Certificado de Submissão de Peça)
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> (Sociedade dos Engenheiros Automotivos)
SOP	<i>Start Of Production</i> (Início da Produção)
UP	<i>Unit Pump</i> (Bomba de Unidade)

SUMÁRIO

1. Introdução	13
1.1 Contexto do tema.....	13
1.2 Caracterização do problema	13
1.3 Objetivo.....	14
1.4 Justificativa	14
2. Fundamentação teórica	16
2.1 Sistema de injeção diesel.....	16
2.1.1 Sistemas acumuladores de pressão	16
2.1.2 Sistemas distribuidores de pressão.....	17
2.2 Corpo Forjado UP	18
2.3 Forjamento.....	19
2.3.1 Forjamento Livre	19
2.3.2 Forjamento a quente em Matriz Fechada.....	20
2.4 Laminação em rolos.....	21
2.5 Resfriamento controlado	23
2.6 Ensaio não destrutivo	24
2.6.1 Ultrassom.....	24
2.6.2 Partículas magnéticas fluorescentes em via úmido (Magnaflux)	25
2.6.3 Correntes parasitas (Magnaflux).....	25
2.7 Jateamento	26
2.8 Teste de pulsação hidráulica de alta pressão.....	27
2.8.1 Fadiga.....	28
2.8.2 Nucleação e crescimento de trinca	28
2.8.3 Teste de fadiga (Curva de Wöhler)	29
2.8.4 Critérios de avaliação.....	32
2.8.5 Investigação da trinca	32
2.9 Processo de Aprovação de Peça de Produção (PPAP)	33
3. Procedimentos metodológicos e execução das etapas do projeto	35
3.1 Pesquisa de mercado e definição do novo fornecedor	35
3.2 Elaboração de um processo de fabricação mais enxuto	37
3.3 Validação do novo processo	43
3.3.1 Preparação para o teste de Pulsação Hidráulica de Alta Pressão.....	44
3.3.2 Preparação das amostras	46
3.3.3 Procedimento Laboratorial	47
3.4 Obtenção dos resultados	48
4. Resultados	50

4.1	Validações	50
4.1.1	Teste de pulsação hidráulica de alta pressão	50
4.1.2	Análise Metalográfica.....	54
4.1.3	Fibramento.....	56
4.1.4	Dureza	57
4.1.5	Descarbonetação.....	58
4.1.6	PPAP	60
4.2	Ganhos processuais e econômicos.....	62
5.	Conclusão.....	63
6.	Referências.....	64

1. Introdução

1.1 Contexto do tema

A indústria automobilística brasileira é um dos ramos de maior destaque na economia do país. De acordo com dados extraídos da ANFAVEA, no ano de 2014 o setor automobilístico empregava, direta e indiretamente, cerca de 1,5 milhão de pessoas, representando exatos 20,4% do PIB industrial (4,1% do PIB total) do Brasil, e constando como 8º produtor mundial de automóveis (ANFAVEA, 2016).

Os desafios da competição entre as montadoras de veículos provocam a necessidade de reduzir custos, bem como o aumento na exigência de qualidade dos produtos e serviços que estas empresas recebem de seus fornecedores. Cresce, portanto, a imposição de uma gestão estratégica da cadeia de componentes, na busca por maior desempenho e competitividade. Muito embora exista atualmente uma tendência das empresas relacionarem-se com um número menor de fornecedores, ou mesmo de um fornecedor único, essa prática evidencia um potencial risco de aumento da dependência na relação entre cliente e fornecedor, além de sujeitar o comprador a eventuais falhas no fornecimento e deixá-lo vulnerável a flutuações do preço dos produtos.

Com isso, pode-se verificar que o desenvolvimento de fornecedores alternativos é, ainda, uma estratégia vantajosa para grandes empresas, permitindo com isso um maior poder de barganha, decorrente da inevitável concorrência entre fornecedores. Assim, evidencia-se a necessidade do aprofundamento no estudo do desenvolvimento de fornecedores, de seus benefícios e peculiaridades. Adicionalmente, em busca de um fornecedor alternativo de autopeças, bem como da exigência do mercado de produção de bens de consumo, mais do que nunca, evidencia-se a necessidade de oferta de produtos de maior qualidade a um custo menor.

1.2 Caracterização do problema

Diante do contexto apresentado, tem-se que uma empresa multinacional do ramo automobilístico responsável pela produção de bombas injetoras diesel, que para fins didáticos foi chamada de Empresa X, a qual busca o desenvolvimento de um fornecedor de autopeças alternativo para um de seus componentes. Assim, considerando a situação acima do atual fornecedor, que foi chamado de Fornecedor A, responsável pela manufatura da bomba injetora diesel UP, evidencia-se a necessidade do desenvolvimento de um novo

fornecedor, bem como a elaboração de um processo de fabricação mais enxuto e, conseqüentemente, a redução de custos no processo de fabricação.

Na situação acima descrita, o processo de conformação mecânica utilizado pelo Fornecedor A em análise preliminar poderia ser melhorado. Além de apresentar elevada incidência de peças com riscos de trincas internas e superficiais, devido ao processo de forjamento livre aplicado na produção o componente. Desta maneira, a solução das falhas apontadas, as quais serão retratadas ao decorrer do trabalho, resultaria numa melhoria significativa na qualidade e tempo de ciclo do processo.

Salienta-se que, em atenção aos encargos previamente acordados entre as partes envolvidas, o Fornecedor A compromete-se a criar, em um possível período de transição, um estoque de segurança de 12 (doze) meses até o desenvolvimento do novo fornecedor, que foi chamado de Fornecedor B.

1.3 Objetivo

O objetivo do projeto foi desenvolver um fornecedor alternativo do ramo metalúrgico para a fabricação do corpo forjado da bomba injetora a diesel UP (*Unit Pump*), tendo como base todas as especificações já fornecidas pela engenharia do produto, tais como: normas, desenhos de fabricação, lista de peças, etc.

Os objetivos específicos são:

- Minimizar a dependência entre o cliente e o fornecedor;
- Reduzir o preço de venda do componente;
- Elaborar um novo processo de fabricação mais enxuto.

1.4 Justificativa

O projeto desenvolvido refere-se a um problema real e comumente encontrado no mercado de bens de consumo global. Portanto, o trabalho se justifica principalmente pela concreta necessidade de continuação de negócio, bem como melhorias técnicas no processo de fabricação do componente forjado.

Este trabalho justifica-se também pela possibilidade de abordar assuntos técnicos dentro de uma empresa multinacional que dispõe de profissionais qualificados, além de aplicar conhecimentos multidisciplinares para a concretização do projeto com conseqüente busca por conhecimentos específicos abordados no curso de Engenharia Mecânica, sendo eles:

- Processos de fabricação: forjamento, laminação, lingotamento contínuo;
- Desenho técnico e desenho de máquinas;
- Probabilidade e estatística;
- Comportamento mecânico dos materiais;
- Ensaio não destrutivo;
- Metrologia;
- Qualidade;
- Controle estatístico de processo;
- Análise de custos industriais;
- Gestão de pessoas;
- Metodologia de projetos;
- Medições de grandezas mecânicas;
- Motores a combustão interna.

2. Fundamentação teórica

2.1 Sistema de injeção diesel

O sistema de injeção diesel é crucial para um motor com o funcionamento “Ciclo Diesel”. Estes sistemas têm como finalidade a injeção em alta pressão na câmara do combustível do motor e não requerem corrente elétrica ou centelha para a iniciar a combustão, diferentemente do “Ciclo Otto” (WHITELAW, PAYRI, ARCOUMANIS & DESANTES, 2002).

Esta injeção à alta pressão garante que haja um preenchimento homogêneo na câmara de combustão, auxiliando assim uma queima homogênea do óleo diesel durante a combustão. Atualmente, os sistemas de injeção são divididos em dois grupos principais: sistemas acumuladores de pressão e sistemas distribuidores de pressão (WHITELAW, PAYRI, ARCOUMANIS & DESANTES, 2002).

2.1.1 Sistemas acumuladores de pressão

Para este sistema, há a geração de pressão de injeção do combustível em momentos separados. Um modelo desse sistema de injeção diesel pode ser verificado na figura 1.



Figura 1 - Sistema de geração de pressão para a injeção de combustível
Fonte: Figura interna da Empresa X

Basicamente, a bomba de alta pressão comprime o combustível, nas quantidades informadas pela unidade de comando eletrônico (ECU), através de compressão mecânica e então o combustível é levado através de condutores de alta pressão até o tubo distribuidor (*Common Rail*) que funciona como um acumulador de pressão para todos os injetores (BENNETT, 2009).

Os injetores que contêm o bico injetor, válvula solenóide e conexões hidráulicas e elétricas para acionar o módulo do bico são então acionados pelo módulo eletrônico para desobstruírem os canais dentro dos bicos de injeção através de um sistema de indução eletromagnética com retorno via mola. Sendo assim, a canaleta do sistema acumulador de pressão sempre possui a pressão necessária para a injeção correta no cilindro, e a central eletrônica controla com grande precisão o momento e a duração de injeção necessária (BENNETT, 2009).

2.1.2 Sistemas distribuidores de pressão

Diferentemente do citado no item anterior, neste sistema a pressão é gerada no momento de injeção e possui uma bomba individual para cada cilindro, o que estabelece uma peça compacta (bomba mais bocal) instalada diretamente na cabeça do cilindro (BENNETT, 2009).

Têm-se como alguns exemplos comerciais o *Unit Pump* (UP) e o *Unit Injector* (UIN) ilustrados pela figura 2. Estes são sistemas onde a pressão no combustível é gerada no momento da injeção, ou seja, a injeção é feita diretamente com o acúmulo de pressão.



Figura 2 - Exemplos de sistemas comerciais de distribuidores de pressão: *Unit Injector* (esquerda) e *Unit Pump* (direita)

Fonte: Figura interna da Empresa X

Os sistemas de geração de pressão precisam estar em contato direto com o motor, via eixo com cames, para que a geração de pressão seja feita no momento certo. Eles são divididos em relação ao acionamento do sistema. Alguns sistemas possuem controle eletrônico da abertura e fechamento dos furos de injeção, e outros sistemas, mais simples, não o possuem, deixando os furos de injeção sempre desobstruídos (BENNETT, 2009).

2.2 Corpo Forjado UP

O corpo forjado utilizado em uma bomba injetora diesel tipo UP, ilustrado pela figura 3, possui como funções principais alojar os componentes e resistir à pressão de injeção do combustível diesel que, para este componente, ficam na faixa de 1600 a 2130 bar de aplicação.

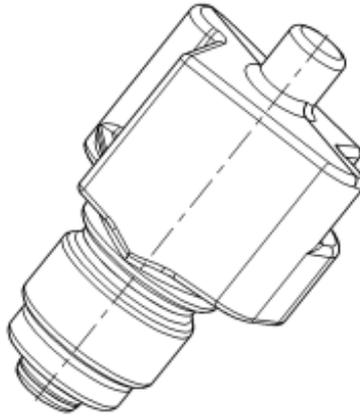


Figura 3 - Desenho esquemático do corpo forjado da bomba injetora a diesel
Fonte: Figura interna da Empresa X

A figura 4 abaixo apresenta a vista explodida do corpo da bomba injetora já no estágio final de fabricação na Empresa X, bem como os componentes que são utilizados na montagem.

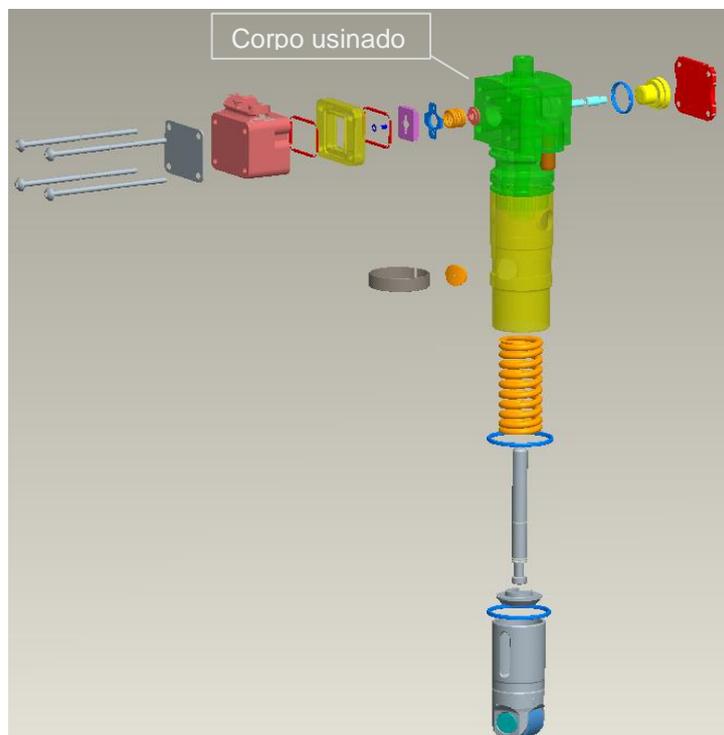


Figura 4 - Representação do desenho em vista explodida da Unit Pump com seus componentes
Fonte: Figura interna da Empresa X

A seguir são abordados os processos de fabricação do corpo forjado, bem como os meios de inspeção de descontinuidades e a teoria por trás dos testes realizados para a validação do componente.

2.3 Forjamento

O forjamento também é um processo de conformação mecânica por meio do qual se obtém a forma desejada a partir do martelamento ou pela prensagem gradativa de um material. No martelamento a deformação age principalmente nas camadas superficiais do material a ser deformado, enquanto que a prensagem atinge as camadas mais profundas, causando uma deformação mais regular que o forjamento por martelamento (CHIAVERINI, 1986). Esse processo tem como vantagem um grande aproveitamento de matéria prima, a peça forjada apresenta microestrutura homogênea e livre de porosidades, além de possuírem um fibramento favorável às propriedades mecânicas exigidas. As fibras surgem a partir da orientação cristalográfica preferencial do material quando são aplicados esforços de conformação, conforme mostrado na figura 6. Por isso, é muito importante considerar no projeto as direções das solicitações mecânicas, estáticas e dinâmicas, que serão aplicadas no forjamento para obter fibras com orientação de maior resistência da peça (SCHAEFFER, 2001).

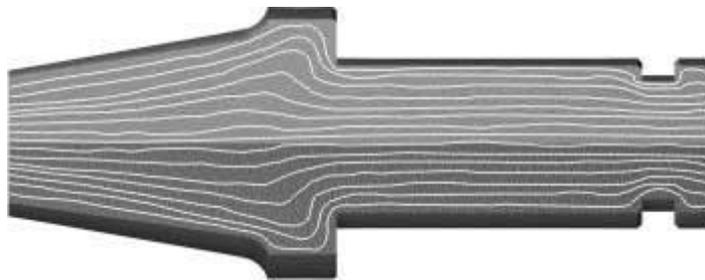


Figura 5 - Orientação das fibras da peça após a conformação
Fonte: Beltechnology&M

Entre os defeitos que podem ocorrer durante o processo de forjamento livre podem ser citados trincas superficiais e internas, falta de redução (penetração incompleta do metal na cavidade da ferramenta), gotas frias, incrustações de óxidos, descarbonetação e queima (CHIAVERINI, 1986).

2.3.1 Forjamento Livre

No processo de forjamento livre o material é deformado com a aplicação de ferramentas simples, geralmente planas, que atuam por compressão direta no material.

Assim, o material escoá no sentido perpendicular à direção de aplicação da força, onde é a região com menor atrito. Esse processo tem como objetivo ser uma operação preliminar para fazer uma pré-forma do produto final. É utilizado, em geral, na deformação de peças brutas vindas direto da aciaria como lingotes, tarugos, blocos, entre outras formas para que, posteriormente, seja realizado o forjamento em matriz (CHIAVERINI, 1986).

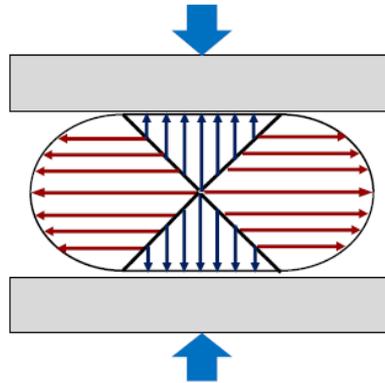


Figura 6 – Representação esquemática das tensões internas sofridas pelo material no processo de forjamento livre.

Fonte: Figura interna da Empresa X

2.3.2 Forjamento a quente em Matriz Fechada

O processo de forjamento em matriz fechada é realizado para conformar precisamente o material de acordo com a forma definida pela matriz. A deformação ocorre sob alta pressão em uma cavidade fechada e bipartida com a finalidade de obter peças forjadas com tolerâncias dimensionais mais estreitas (ALTAN, NGAILE, & SHEN, 2005).

Para justificar os altos custos de fabricação de matrizes de forjamento, é necessário um grande volume de produção de peças. Outro ponto importante é em relação à quantidade de material necessária que precisa ser suficiente para o preenchimento completo da matriz. Por isso, é comum trabalhar com um pequeno excesso de material, devido à difícil determinação dessa quantidade. A consequência gerada é que são necessários processos após a conformação para a retirada das rebarbas formadas pela sobra de material, chamado de rebarbação (SCHAEFFER, 2001).

A temperatura de operação é muito importante para o resultado e a eficiência do forjamento. Portanto, o material precisa ser aquecido a uma temperatura que permita uma elevada plasticidade, do início ao fim do processo produtivo. A temperatura de forjamento varia de acordo com a composição do material, porém para aços em geral essa temperatura deve variar entre 800 e 1100 °C (ALTAN, NGAILE, & SHEN, 2005).

As quedas de temperatura que ocorrem durante o forjamento são por transferência de calor por radiação, entre o ambiente e a peça, e por condução, entre a peça e a matriz. Contudo essa última mencionada tem maior impacto, pois é o contato entre o material e a ferramenta que ditam a velocidade de esfriamento. Não é interessante que haja um rápido esfriamento, já que o material perde plasticidade e a queda brusca de temperatura pode causar defeitos na peça. Por isso, quando necessário, a matriz é aquecida antes do forjamento de forma que o esfriamento ocorra de forma mais lenta. Para que ocorra uma produção com menos impacto por perdas de temperatura é recomendado que o contato entre a peça e a ferramenta seja o menor possível e que a relação entre a área superficial da peça e seu volume sejam pequenos para evitar grandes perdas de temperatura (ALTAN, NGAILE, & SHEN, 2005).

A precisão dimensional das peças forjadas depende essencialmente dos procedimentos de fabricação, conservação das ferramentas, dimensões do material inicial e características de fabricação da peça. Além disso, as tolerâncias dependem da temperatura de trabalho, da intensidade de oxidação superficial e de perdas de material por queima. Para adquirir tal qualidade existem normas específicas para peças forjadas que são amplamente aplicadas na indústria, tais como ASTM, DIN e ISO (RODRIGUES & MARTINS, 2005).

2.4 Laminação em rolos

É um processo que tem como função reduzir a seção transversal de barras ou tarugos por deformação plástica a partir da passagem em dois rolos cilíndricos que giram em direções opostas e possuem ranhuras ou entalhes coincidentes em cada cilindro (BUTTON & GENTILE, 2001). Ele objetiva aumentar o comprimento das barras, reduzir o diâmetro ou modificar a seção transversal do material. Esse processo é simples, rápido e precede, na maioria das vezes, as operações de recalagem ou forjamento em matriz fechada (CHIAVERINI, 1986).

As vantagens desse processo em relação a outros com resultados parecidos, como recalque horizontal e forjamento, são: economia de material e energia, maior produtividade, melhor acabamento superficial, melhoria na resistência à fadiga, fácil automatização do processo, além de apresentar melhor precisão dimensional e menores custos (WEROŃSKI & PATER, 1992).

A laminação por rolos ainda possibilita, além de todas as vantagens mencionadas, que todas as forças aplicadas para a deformação plástica do material sejam homogêneas e

balanceadas, ou seja, a peça é comprimida por forças em todas as direções e de mesma magnitude, visto na figura 5. Essa ação é fundamental para minimizar trincas internas e externas, haja visto que existe um equilíbrio de forças aplicados tanto no interior como no exterior da peça (SMIRNOV, 1947).

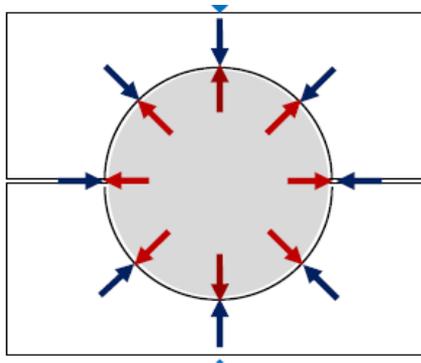


Figura 7 - Representação esquemática das tensões internas sofridas pelo material no processo de laminação em rolos

Fonte: Figura interna da Empresa X

A laminação em rolos pode ser executada a quente ou a frio. No processo a quente, o material é aquecido em fornos de indução para garantir a qualidade superficial da peça.

Os defeitos característicos desse processo são divididos em três grupos: defeitos internos (cavidades e poros), defeitos de superfície e seções com geometria diferente do esperado (JOHNSON & MAMALIS, 1977).

O defeito mais frequente encontrado nesse processo chama-se efeito Mannesmann, que consiste na formação de uma cavidade central no processo com dois rolos. Esse defeito está relacionado, segundo os estudos de Smirnov, a partir de duas possíveis causas. A primeira seria pela alta tensão de cisalhamento aplicada no centro da peça durante o processo, com isso pequenas trincas já existentes no material se propagam devido à deformação plástica sofrida pela peça. A segunda refere-se que o defeito está ligado às tensões de tração acumuladas durante um certo número de revoluções da peça. Outros fatores ligados à formação do efeito Mannesmann são a torção relativa entre as bordas e os diâmetros da peça e inclusões presentes no material (SMIRNOV, 1947). A seguir, a figura 8 ilustra este efeito:

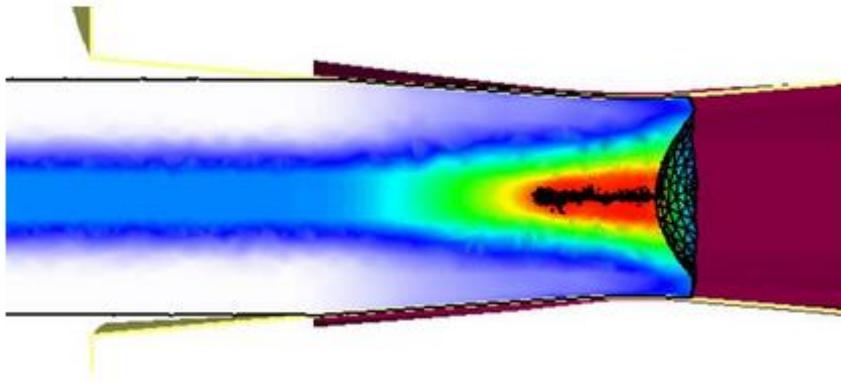


Figura 8 – Efeito Mannesman
Fonte: AFDEX

Os defeitos superficiais encontrados nesse processo são: canaletas espirais, empescoçamento e dobramento. As canaletas são atribuídas a trincas superficiais presentes na matéria prima ou ao atrito entre peça e ferramenta devido ao uso de ferramentas pontiagudas. O empescoçamento acontece por causa da presença de forças axiais não equilibradas, podendo haver deformação indesejada e até quebra da peça em regiões de menor diâmetro. O dobramento ocorre quando é utilizada uma ferramenta de canto vivo, a qual deforma o material de modo que se obtém uma peça com diâmetro reduzido e com tendência a dobrar-se. Todos os defeitos superficiais podem ser eliminados com um projeto robusto de ferramenta, o qual deve evitar cantos vivos, ângulos agudos e considerar forças axiais equilibradas em todos os sentidos da aplicação (DANNO & TANAKA, 1984).

Os defeitos relacionados à má formação da seção transversal são achatamento e torcionamento. O primeiro é causado devido ao escorregamento da peça em relação à ferramenta pelo fato da força tangencial atuando na peça ser maior que a força de atrito entre peça e ferramenta. O segundo defeito ocorre a partir da diferença entre de força tangencial e de atrito ao longo da peça (WEROŃSKI & PATER, 1992).

2.5 Resfriamento controlado

O resfriamento controlado é realizado imediatamente após o forjamento a quente, aproveitando o calor retido pelo material, de forma a garantir uma taxa de resfriamento adequada para a formação da microestrutura desejada e obtenção de propriedades requeridas. Em geral, é muito utilizado em peças que passarão por processos de usinagem posteriores (GHOSH et al, 2003).

Um dos fatores mais impactantes é a velocidade em que é realizado esse processo. Por meio da variação da velocidade de resfriamento, são obtidas diferentes fases e diferentes proporções dessas fases no aço. Outros fatores que impactam diretamente no resfriamento controlado são: dimensões da peça e composição química do material (CHIAVERINI, 2012).

A grande vantagem do resfriamento controlado é que substitui processos de tratamento térmico, pois o refino de grão resultante quando comparado pelos dois processos é muito parecido. Como consequência, os benefícios adquiridos são economia de tempo e energia que seriam gastos num forno para tratamento térmico, reduzindo custos do processo, maior produtividade e preservação ambiental (GHOSH et al, 2003).

2.6 Ensaios não destrutivos

Os ensaios não destrutivos são fundamentais para a fabricação de componentes mecânicos, permitindo a inspeção sem prejudicar a operacionalidade do componente e avaliar as discontinuidades apresentados pelos materiais. A escolha apropriada do método não destrutivo é feita dependendo do tamanho das discontinuidades a serem detectados e dependendo do material a ser inspecionado (CORRÊA, DA COSTA, & SCHAEFFER, 2014).

2.6.1 Ultrassom

Inspeções por ultrassom para a avaliação de componentes mecânicos costumam ser usados para verificação de discontinuidades internas. A partir dele é possível estimar sua localização, o tamanho e as características do defeito com uma razoável precisão (SPIES & RIEDER, 2010).

Um dos equipamentos encontrados usualmente para a realização do teste de ultrassom é evidenciado pela figura 9.



Figura 9 - Exemplo de equipamento de ultrassom utilizado na indústria
Fonte: Multiflux

2.6.2 Partículas magnéticas fluorescentes em via úmido (Magnaflux)

O ensaio não destrutivo por partículas magnéticas, também conhecido com o nome comercial *Magnaflux*, consiste em magnetizar um componente e espalhar sobre ele um líquido contendo partículas de ferro a fim de verificar descontinuidades superficiais e sub superficiais rasas, que é ilustrada pela figura 10 (LOVEJOY, 2012).

O campo magnético criado por um sistema magnético induzido (bobina e solenoide) que faz com que as partículas ferro magnéticas na solução se alinhem com o campo. Se houver alguma descontinuidade, as partículas se alinham sobre ela. Muitas vezes as trincas não são identificadas a olho nu, por isso utiliza-se a luz fluorescente, a qual ajuda na identificação da trinca. A profundidade da trinca pode ser avaliada pela quantidade de partículas depositadas sobre ela (LOVEJOY, 2012).

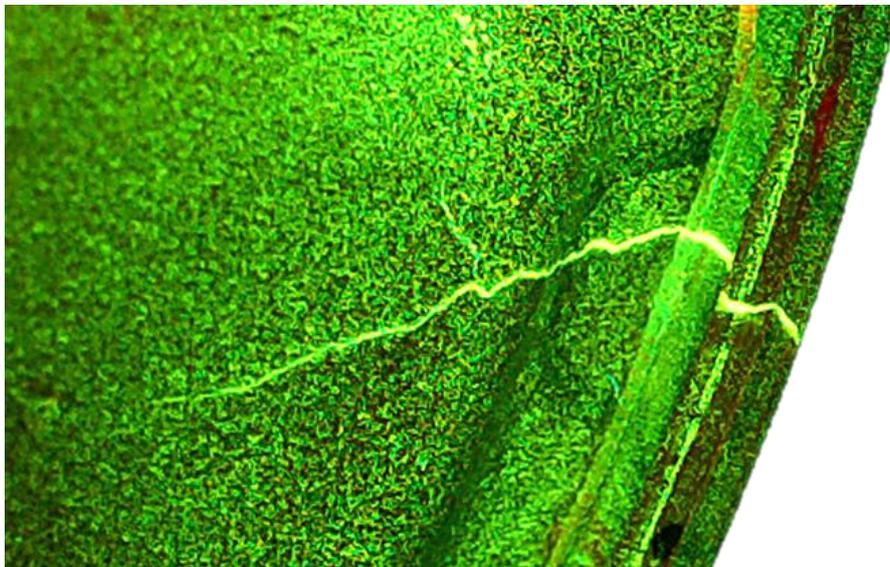


Figura 10 - Trinca superficial revelada em um componente forjado a partir do ensaio de partículas magnéticas

Fonte: Eccleston Aviation

Caso seja identificada a descontinuidade no ensaio de partículas magnéticas, a peça é rejeitada. Caso contrário, a peça segue para outras inspeções de qualidade (LOVEJOY, 2012).

2.6.3 Correntes parasitas (Magnetest)

O ensaio de correntes parasitas, comercialmente conhecido como *Magnetest*, é realizado para o controle de qualidade de componentes, cuja função é garantir que não haja contaminação da matéria prima do componente durante os processos de fabricação.

Também é um método para medir a dureza do material, depois de submetido a um tratamento térmico (BERTOTTI, 1985).

Um exemplo de equipamento utilizado para fazer esse teste é representado pela figura 11.



Figura 11 - Equipamento utilizado para executar o ensaio não destrutivo por correntes parasitas
Fonte: Arotec Indústria e Comércio

As correntes parasitas são baseadas no fenômeno de perda de correntes de Foucault, comumente conhecido na indústria como *Eddy Current* (em inglês) e *Wirbelströme* (em alemão). Basicamente, elas “roubam” ou perturbam a corrente elétrica de um circuito. Esta perturbação varia de acordo com o material imerso no campo eletromagnético gerado por uma bobina e pode ser medida comparando a corrente elétrica perturbada por uma peça em relação à outra (BERTOTTI, 1985).

Materiais com ligas diferentes, que por consequência possuem características físicas e químicas diferentes, causam perturbações diferentes, quando realizado o ensaio de correntes parasitas (BERTOTTI, 1985).

2.7 Jateamento

O jateamento (*shot blasting*) é um processo em que um material abrasivo é acelerado a partir de uma corrente controlada por um jato de ar comprimido e dirigido para a superfície de um componente, como pode ser visto na figura 12:



Figura 12 - Jateamento feito por partículas abrasivas em um componente mecânico
Fonte: International Finishing Corporation

Sua função é remover rebarbas e carepas que podem interferir com a integridade, a aparência ou aplicação da peça, a fim de limpar e preparar a superfície para tratamento posterior (TOTTEN, HOWES & INOUE, 2002).

2.8 Teste de pulsação hidráulica de alta pressão

O teste mais importante em termos da funcionalidade do corpo forjado e da bomba injetora, como um todo, é o teste de pulsação hidráulica de alta pressão. Ele consiste em calcular a máxima pressão que um componente, em um sistema de injeção, consegue suportar com uma taxa de falha de uma peça por milhão. O teste de pulsação hidráulica também facilita a análise, quando houver falhas, de identificar quais são as áreas críticas no componente, que posteriormente são investigadas (Estados Unidos Patente Nº US 9193000 B2, 2010).

Caso se verifique após o teste e análises que o sistema não é robusto suficiente para a pressão desejada, é um sinal de que o processo, o design ou o material atualmente utilizado não é apto para produção de peças com qualidade. Tal teste é utilizado amplamente na indústria, na área de injeção de sistemas diesel para liberação de amostras, exames de requalificação de qualidade de produtos, validação de alterações em processos, mudanças de matéria prima, entre outros (Estados Unidos Patente Nº US 9193000 B2, 2010).

O teste de pulsação é utilizado na determinação de valores característicos, descrevendo o comportamento mecânico dos materiais quando submetidos a uma carga cíclica alternante. Essa carga pode variar de 0 a 4500 bar, possuindo um comportamento senoidal. Os componentes do sistema de injeção são sujeitos a esse teste por um número

de ciclos determinado, que na maioria das vezes corresponde ao fim da vida útil do material (vida em fadiga).

2.8.1 Fadiga

A fadiga é conceituada dentro da ciência dos materiais como uma falha estrutural que ocorre quando um material é submetido a carregamentos variáveis. Essa falha é caracterizada pela geração e propagação de uma trinca até a eventual fratura do material (NORTON, 2013).

Esse é o tipo de falha mais comum em componentes mecânicos (entre 50 e 90% dos casos). Isso acontece pelo fato de que as tensões repetidas aplicadas no componente para gerar uma ruptura são muito inferiores às necessárias para causar a fratura devido a uma carga estática (NORTON, 2013).

A consequência disso é que a falha ocorre de modo repentino e inesperado, muitas vezes de forma brusca, com características de uma ruptura frágil (NORTON, 2013).

2.8.2 Nucleação e crescimento de trinca

As regiões de um componente submetidas a uma maior sollicitação mecânica possuem maior probabilidade de gerar e propagar trincas. Em carregamentos com grandes amplitudes de pressão, grande parte da vida em fadiga de um material é consumida na propagação da trinca (LEE, PAN, HATHAWAY & BARKEY, 2005).

A propagação de trincas possui três estágios: nucleação, crescimento e ruptura. No primeiro estágio, as trincas começam a se nuclear na superfície dos planos metalográficos e possuem um crescimento pouco expressivo, na ordem de micrometros por ciclo, em direção aos contornos de grão. Em testes realizados com baixa carga em corpos de prova, mais de 70% da vida em fadiga do componente é utilizada para a iniciação do primeiro estágio (LEE, PAN, HATHAWAY & BARKEY, 2005).

O estágio dois se inicia quando a trinca já possui alguns décimos de milímetro e sua propagação é voltada à direção perpendicular ao eixo de tensão. Ele é caracterizado pelo surgimento de estrias, que marcam o crescimento da trinca a cada ciclo de carregamento. Só há propagação no segundo estágio quando são aplicadas tensões de tração, que possibilitam a ruptura do material. Podem surgir também marcas no material chamadas de linhas de praia ou linhas de repouso, que são formadas por parada do crescimento da trinca

ou por uma sobrecarga que imobiliza seu crescimento por um tempo (LEE, PAN, HATHAWAY, & BARKEY 2005).

O último estágio, que é o mais rápido de todos, ocorre quando a trinca atinge um tamanho crítico, suficiente para a ruptura final, que acontece de forma brusca e inesperada no material. A estrutura do material após a falha por fadiga apresenta características macroscópicas de uma fratura frágil (LEE, PAN, HATHAWAY & BARKEY, 2005).

A ilustração desses três estágios é feita pela figura 13, na qual é possível identificar o ponto de nucleação da trinca, linhas de repouso formadas na propagação da trinca e qual é o aspecto da ruptura, que nesse caso ocorreu por cisalhamento.

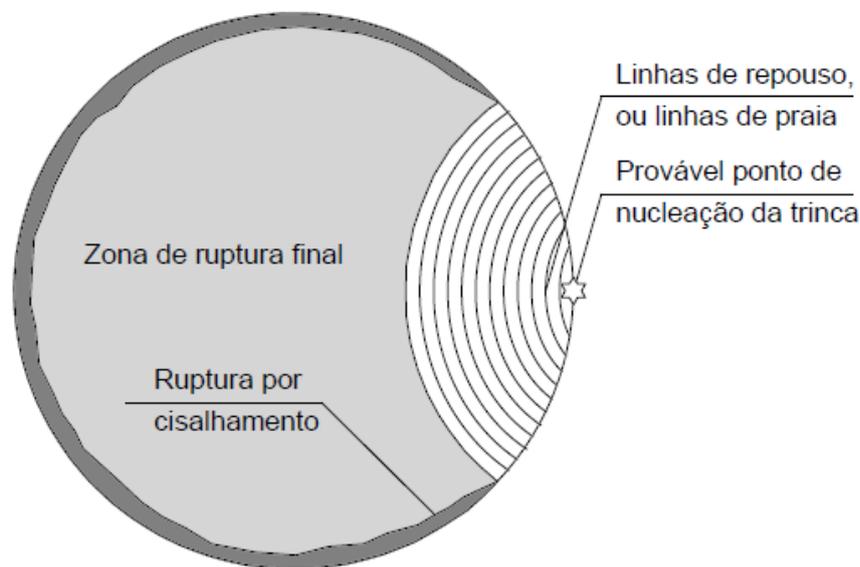


Figura 13 - Aspecto macroscópico de uma ruptura por fadiga, indicando ponto de início e sua propagação.

Fonte: Mecânica da Fratura e da Fadiga – Edison da Rosa (2002)

2.8.3 Teste de fadiga (Curva de Wöhler)

A resistência à fadiga é determinada de forma mais eficiente pelo procedimento desenvolvido por August Wöhler. Nesse procedimento, são aplicadas tensões pulsantes em diversos componentes de mesmo material e possuindo mesma geometria e condição superficial (MARQUARDT, Performing and Evaluating Wöhler Tests of Internally Pressurized Components, 2015).

A oscilação das tensões empregadas no teste de pulsação tem um formato senoidal. Para caracterizar essa curva, são utilizados como parâmetros, demonstrados na figura 14, a

amplitude de pressão [p_a], a pressão média [p_m], a amplitude de pressão do ciclo [Δp], a pressão mínima [p_{\min}] ou a pressão máxima [p_{\max}]. Porém somente duas das seis variáveis são linearmente independentes, a amplitude de pressão do ciclo [Δp] e a pressão máxima [p_{\max}] (MARQUARDT, Performing and Evaluating Wöhler Tests of Internally Pressurized Components, 2015).

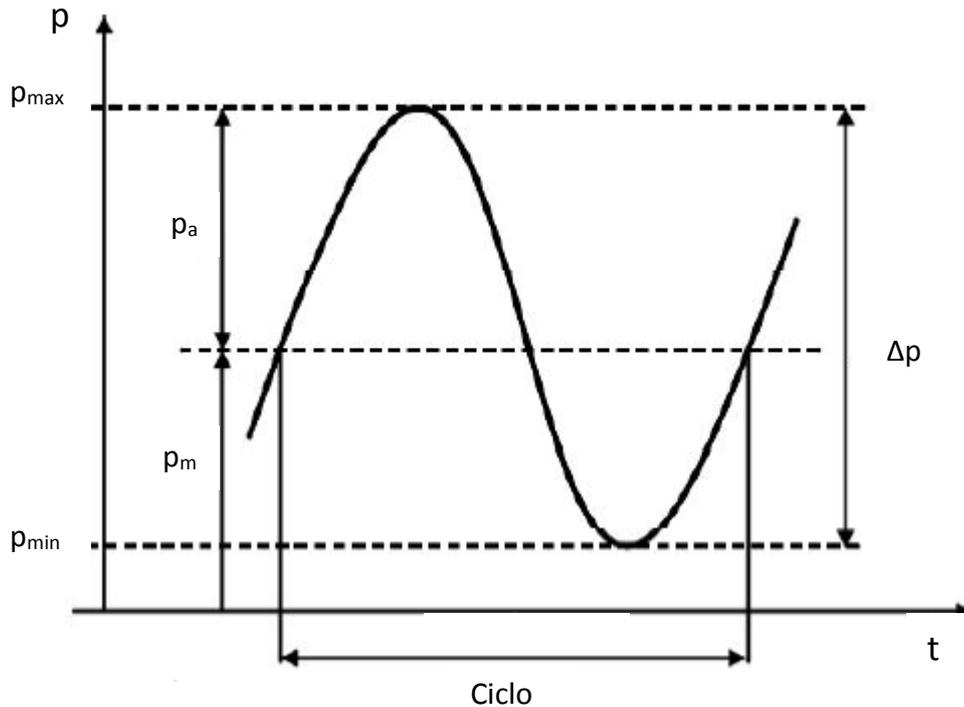


Figura 14 - Parâmetros de caracterização do carregamento cíclico.
Fonte: Autoria própria (2016)

A variação do carregamento no teste de Wöhler é preferencialmente progressivo, a fim de determinar o número de ciclos necessários para romper. A função que relaciona a amplitude de carga aplicada e o número de ciclos para falhar é chamada de curva de Wöhler. A pressão de fadiga é dividida em três regiões: fadiga de ciclo baixo, fadiga de ciclo alto e vida infinita, como pode ser verificado na figura 15 (MARQUARDT, Performing and Evaluating Wöhler Tests of Internally Pressurized Components, 2015).

Os carregamentos aplicados na região de fadiga de ciclo baixo podem ser muito altos, causando deformações plásticas significantes. Já na região de fadiga de ciclo alto, o valor máximo do carregamento é consideravelmente maior que o limite de fadiga. Com isso, o componente precisa ser dimensionado para um número finito de ciclos de carregamento (SCHEFFOLD & WEIHING, 2011).

No projeto de componentes, em que se deseja uma durabilidade a fadiga máxima, é assumido que a carga máxima aplicada seja abaixo ou igual ao limite de fadiga permissível do componente em uma probabilidade de falha definida. Na prática, é utilizado como referência uma peça por milhão com confiabilidade de 90% para componentes relevantes à segurança (SCHEFFOLD & WEIHING, 2011).

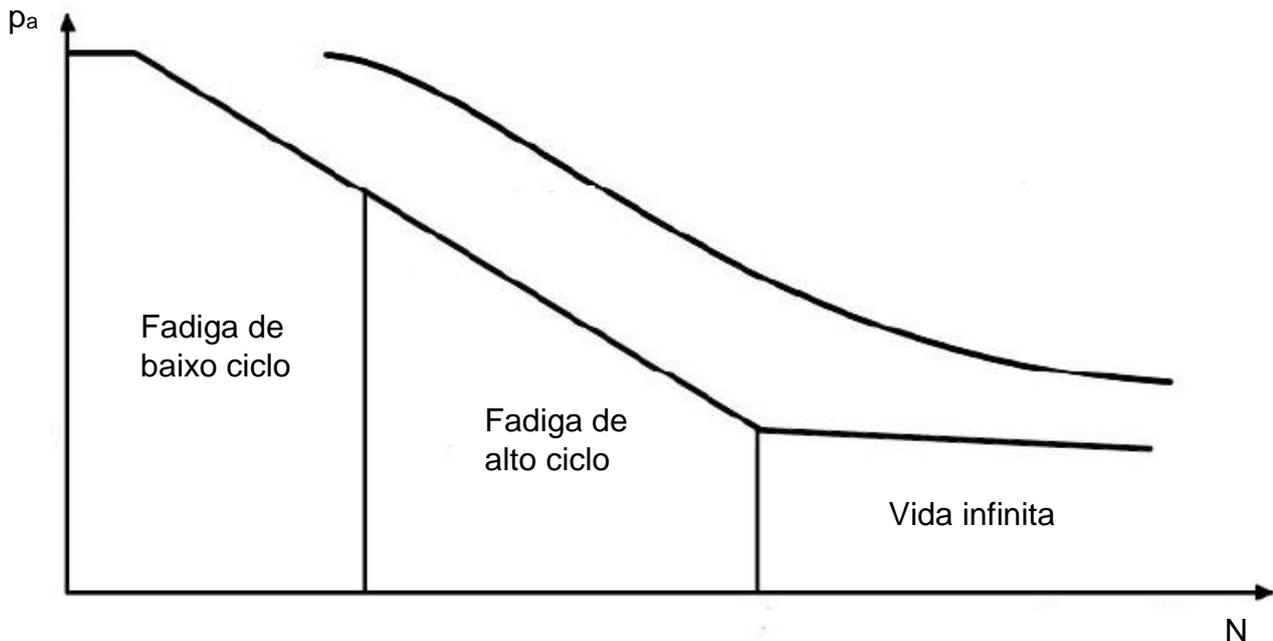


Figura 15 - Curva de Wöhler delimitada pelas regiões de fadiga de ciclo baixo, de ciclo alto e de vida infinita.

Fonte: Autoria própria (2016)

Durante os testes de fadiga para determinar a curva de Wöhler, o carregamento é constante em função do tempo, ao contrário da situação real em que o carregamento no componente varia em relação ao tempo. Levando em conta um carregamento dependente do tempo, o limite de fadiga possibilita um projeto de componente econômico que atende à sua função e ao seu tempo de vida especificado (MARQUARDT, Performing and Evaluating Wöhler Tests of Internally Pressurized Components, 2015).

Para conseguir desenvolver projetos de componentes duráveis é necessário que a proporção de carregamentos que ultrapassa o limite de fadiga seja restringida. Por esse motivo, as variações de carga precisam ser determinadas para que o projeto atinja o objetivo de obter um componente durável. O conceito de vida útil finita é baseado, via de regra, no dimensionamento de uma aplicação limitada entre 10^4 e 10^9 ciclos de carregamento (MARQUARDT, SCHEFFOLD, & WEIHING, 2009).

Materiais não homogêneos ou desvios na fabricação dos componentes podem gerar variações entre si do limite de fadiga. Como consequência, a curva de Wöhler pode ser fornecida somente como referência para uma probabilidade específica de falha. Com a ajuda de métodos estatísticos, as curvas de Wöhler são calculadas para três probabilidades de falha (P_f): 10, 50 e 90% (MARQUARDT, SCHEFFOLD, & WEIHING, 2009).

A variação na amplitude de pressão que pode ser tolerado é caracterizado pela faixa de dispersão T_S . Similarmente, a variação na região de fadiga de alto ciclo é descrita por T_N . Assim, a curva de Wöhler pode ser aproximada para duas linhas retas em um gráfico de escala duplo logarítmica. A interseção das duas linhas retas evidencia o número de ciclos N_E , que é o número de ciclos da transição da região de fadiga de alto ciclo para a região de vida infinita (MARQUARDT, 2015).

2.8.4 Critérios de avaliação

Como o número de fatores que afetam a resistência à fadiga é muito grande, sendo maior parte deles indetectáveis, os resultados dos testes de fadiga podem variar mesmo que o teste seja realizado sob as mesmas condições e no mesmo componente. Para isso, é necessária uma avaliação estatística do teste de Wöhler para obter os parâmetros característicos (MARQUARDT, 2015).

Por isso, todos os testes de pulsação devem ter pelo menos dois níveis de pressão: o nível de pressão de fratura e o nível de resistência à pressão. No nível de pressão de fratura, no máximo uma peça pode falhar a cada seis testadas. Já no nível de resistência à pressão, apenas uma peça não falha a cada seis testes realizados. Se forem utilizados outros níveis de pressão, eles são chamados de níveis de pressão de transição (MARQUARDT, 2015).

Assim, os valores da pressão de resistência são calculados, com o auxílio de um software que deriva a curva de Wöhler, a partir dos dados de entrada, que são os níveis de pressão aplicados e do número de falhas nos componentes testados. O valor da pressão de resistência é definido como a pressão com 1 parte por milhão (ppm) de probabilidade de falha (MARQUARDT, 2015).

2.8.5 Investigação da trinca

Após acabar o teste de pulsação hidráulica de alta pressão, os componentes que tiveram trincas mais expressivas são colocados para uma análise mais profunda de como

foram surgidas e se propagaram durante a aplicação de pressão no teste (SCHEFFOLD & WEIHING, 2011).

As trincas consideradas críticas são aquelas que ocorrem durante no ciclo mais baixo e sob a pressão mais baixa entre os níveis ou quando há falha após 1 milhão de ciclos (MARQUARDT, SCHEFFOLD, & WEIHING, 2009).

De acordo com o histórico de falhas apresentados nesse teste (HPPT), a origem mais comum de trincas é a partir de inclusões de Mn-S, Pb e Al-O. (MARQUARDT, 2009)

2.9 Processo de Aprovação de Peça de Produção (PPAP)

O propósito do PPAP é oferecer como evidência que todos os registros de projeto de engenharia do cliente e os requisitos especificados foram devidamente entendidos pela organização que vai fabricar e fornecer o componente. Também tem como função identificar se o processo de manufatura tem potencial para produzir o produto de forma consistente a cumprir os requisitos solicitados durante uma corrida de produção (AIAG, 2006).

A submissão de PPAP é exigida quando houver quaisquer das seguintes ocasiões: a produção de um novo componente ou produto, correção de discrepância de um componente ou produto previamente fornecido e em modificações de engenharia nos registros do desenho, especificações ou materiais do produto (AIAG, 2006).

A organização deve enviar as especificações, convencionadas na indústria automotiva, requeridas referentes a sua produção, além do que for solicitado pelo cliente. Algumas das especificações exigidas são:

- **Documentação técnica:** é necessário que a organização possua a documentação técnica do componente ou produto, na qual deve ser encaminhado o desenho com cotas e tolerâncias, prescrições, normas do cliente, lista de materiais, procedimentos, entre outros requisitados pelo cliente.
- **Relatar a composição do material do componente:** a organização deve providenciar evidência que o material utilizado e especificações do material são os mesmos requeridos pelo cliente. O meio de informação utilizado é feito por um sistema internacional de dados de material (IMDS), que é comumente utilizado na indústria automotiva, onde ficam armazenadas todas as informações referentes a aquele material.
- **Análise do modo e efeito de falha do componente (*Design FMEA*):** a organização responsável pelo projeto de *design* do componente deve desenvolver o *Design*

FMEA de acordo com os requerimentos do cliente, evidenciando os potenciais modos e efeitos de falha e sua respectiva severidade.

- **Diagrama do fluxo de processo:** é um documento que descreve claramente quais são os passos do processo de produção e sua sequência, que esteja de acordo com as necessidades, expectativas e requerimentos do cliente.
- **Análise do modo e efeito de falha do processo (Process FMEA):** assim como o *Design FMEA*, o FMEA de processo deve estar de acordo com os requisitos do cliente, indicando os potenciais riscos de falha do processo de fabricação que possui.
- **Plano de controle:** é utilizado pela organização para definir os métodos utilizados para controlar seus processos e que cumpre com os requerimentos especificados pelo cliente.
- **Estudos de análise do sistema de medição:** a organização deve realizar estudos de análise de sistema de medição, como por exemplo estudo R&R (repetibilidade e reprodutibilidade), linearidade, estabilidade para todos os dispositivos de medição e equipamentos de teste novos e modificados.
- **Resultados dimensionais:** após serem realizadas as medições das amostras do componente, é gerado um relatório dimensional pela organização. Esse documento serve como registro de todas as dimensões, características e especificações, as quais devem cumprir com os requisitos e com a documentação técnica enviados pelo cliente.
- **Índices de qualidade:** a intenção desse requerimento é determinar se o processo de produção é possível de produzir o componente de acordo com as especificações do cliente. Esses índices (C_{pk} e P_{pk}) são estudos de processo que são determinados pelo cliente para todas as características especiais. Quando calculados, esses índices são comparados para analisar os recursos de variação de processo.
- **Amostra de controle:** a organização deve reter uma amostra de controle pelo mesmo período até que o processo de aprovação do componente junto ao cliente se finalize.
- **Certificado de submissão da peça (PSW):** uma vez que os requerimentos de PPAP estão completos, o fornecedor deve preencher o PSW com as informações solicitadas e assinar para aprovação. Após a análise da documentação solicitada pela submissão do PPAP e verificação das amostras encaminhadas pelo fornecedor à empresa validadora do processo, a decisão no PSW se oficializará por esta última em: “Aprovado”, “Aprovado com restrições” ou “Reprovado”.

3. Procedimentos metodológicos e execução das etapas do projeto

Nessa seção é apresentada a metodologia de pesquisa e de execução das etapas do projeto.

A metodologia de pesquisa deste projeto pode ser classificada como bibliográfica por ser tratar de um projeto que utiliza conceitos já publicados por outros autores, quanto de pesquisa participante, pois os autores estão inseridos em um meio produtivo automotivo contextualizado por um problema real.

Portanto, pode-se entender de forma mais clara a metodologia do trabalho se for verificado o fluxograma de atividades planejada exibida pela figura 16, a saber:

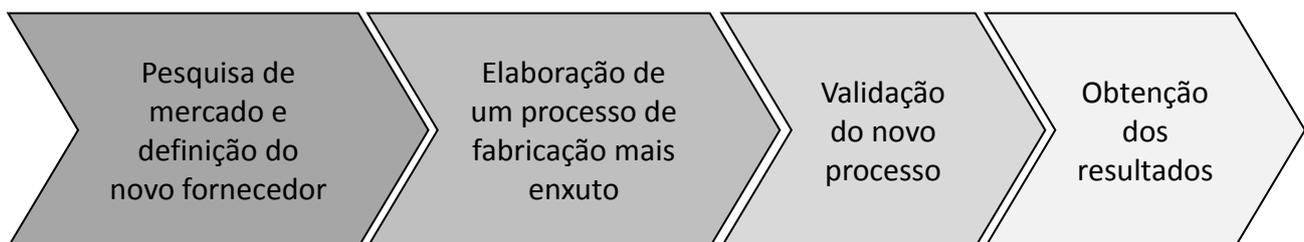


Figura 16 - Fluxograma da metodologia do trabalho
 Fonte: Autoria própria (2016)

3.1 Pesquisa de mercado e definição do novo fornecedor

Antes de iniciar a busca por um novo fornecedor, alguns requisitos mínimos devem ser atendidos com o intuito de que estes atendam os padrões de qualificação que assegurem melhorias na qualidade e conformidades regulatórias para o mercado automotivo. A saber alguns destes:

- Certificação ISO 9001: Sistema de gestão da qualidade;
- Cerificação ISO/TS 16949: Sistema de gestão da qualidade;
- Certificação ISO 14001: Sistema de gestão ambiental;
- NBR 7500: Símbolos de Risco e Manuseio para o Transporte e Armazenamento de Materiais.

Ressalta-se também a importância de utilização dos documentos AIAG abaixo pelos fornecedores à serem cotados:

- Manual do Plano de Controle de Planejamento Avançado de Qualidade (APQP);
- Processo de Aprovação de Peças de Produção (PPAP);
- Manual de Referência de Análise de Sistema de Medição (MSA);
- Manual de Fundamentos de Controle Estatístico de Processo (CEP);
- Manual de Análise do Modo e Efeito de Falha (FMEA).

Após esta verificação inicial, todos os fornecedores interessados na cotação do item devem entrar em contato com a área comercial da Empresa X para a negociação e posterior confirmação técnica por parte dos engenheiros de compras para a nomeação.

Após a nomeação do Fornecedor B, há um contrato padrão acordado entre as partes, o qual é aplicável aos pedidos e programas de remessas e excluem expressamente quaisquer outras condições apresentadas pelo Fornecedor B, com exceção de acordos já previamente descritos. A seguir as principais condições gerais de fornecimento:

- Qualidade deve ser assegurada pelo fornecedor;
- Garantia por parte do fornecedor por defeitos nos produtos pelo período de 36 meses a contar do primeiro licenciamento do veículo ou após a compra de peça de reposição pelo cliente final;
 - Em caso de ação de *Recall* proveniente da ocorrência de defeito de responsabilidade do fornecedor, este deverá cooperar assumindo os custos necessários e apoiando nas medidas corretivas;
 - O fornecedor poderá contratar seguro de responsabilidade civil e *Recall*;
 - A divergência de preço entre pedido ou programa de remessa podem gerar devolução do material ou débito da diferença no ato do pagamento;
 - As partes devem esforçar-se para manter a competitividade;
 - Caso o fornecedor pretenda descontinuar a produção do produto, este deve assegurar a continuidade de entrega, que é de 12 meses, até o desenvolvimento de um fornecedor alternativo;
 - Provisão de peças de reposição devem ser asseguradas pelo prazo mínimo de 10 anos após o fim da produção seriada do componente.

Vale ressaltar que a nomeação de um fornecedor nem sempre se dá pelo mais barato ou o melhor tecnicamente, mas sim à estratégia a longo prazo definido por ambas as partes.

Após realizada a pesquisa de mercado e verificado o atendimento dos requisitos acima descritos, realizou-se uma análise técnica de viabilidade com dois possíveis novos fornecedores, o qual optou pela escolha do Fornecedor B.

3.2 Elaboração de um processo de fabricação mais enxuto

As possibilidades de melhoria do processo de fabricação atual podem ser melhor compreendidas a verificar primeiramente o fluxo de processos, mostrado pela figura 17, de manufatura do corpo da bomba injetora diesel UP:

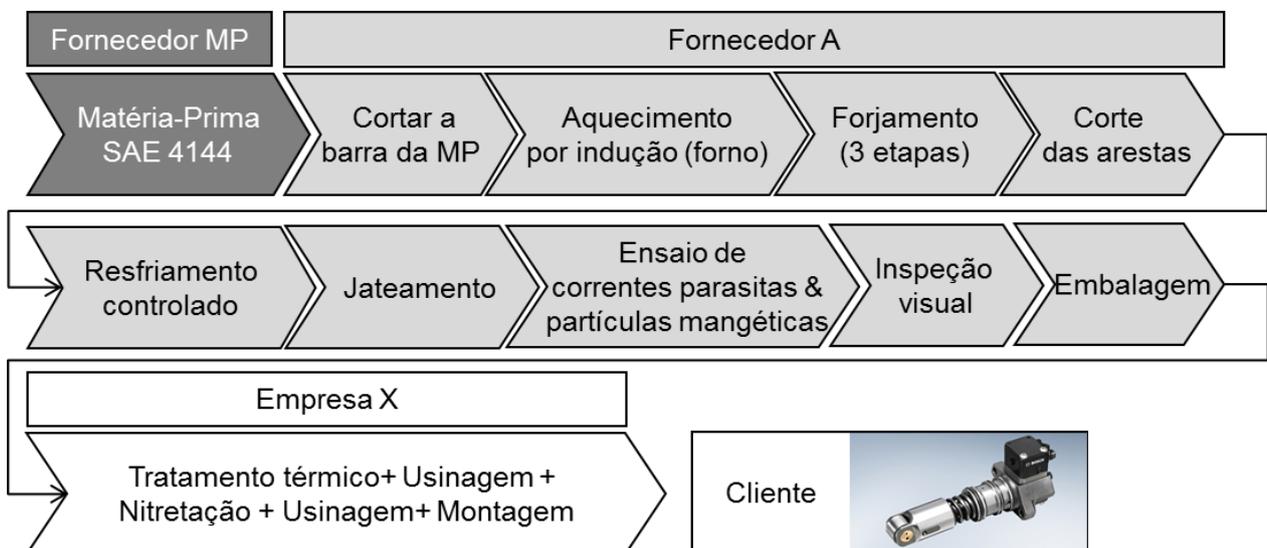
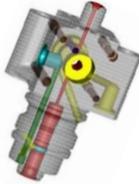


Figura 17 - Fluxo de processos para a manufatura do corpo da bomba injetora no Fornecedor A
Fonte: Autoria própria (2016)

De forma ilustrativa, tem-se o seguinte cenário apresentado pela tabela 1:

Tabela 1 - Fases do produto em diferentes etapas da fabricação e montagem
Fonte: Aatoria própria (2016)

Fonte	Fornecedor MP	Fornecedor A	Empresa X	
Componente	Matéria Prima SAE 4144	Corpo Forjado UP	Corpo UP tratado termicamente e usinado	Bomba injetora montada
Figura				

Se for verificado mais detalhadamente o processo de forjamento de 3 etapas, constituído de um primeiro forjamento livre e as demais etapas em forjamento de matriz fechada, e tomando como base a literatura de Chiaverini (1986) e Button & Gentile (2001), é possível identificar uma possível melhoria na produtividade e qualidade do componente forjado se houver uma mudança no processo de fabricação.

O primeiro processo é o forjamento livre, o qual realiza a pré-forma do material que em seguida passará pelo processo de forjamento em matriz fechada. Porém, conforme verificado na literatura, este pode ocasionar trincas internas e superficiais devido as elevadas tensões de tração e compressão geradas por este processo. Além disto, vale a pena ressaltar que o escoamento ortogonal gerado é livre, e, portanto, podem gerar variações razoáveis em termos de processo de fabricação para as dimensões desejadas.

De acordo com a mesma literatura, existe a possibilidade de reduzir-se o tempo de ciclo e as tensões internas geradas de forma a equilibrá-las e conseqüentemente reduzir a possibilidade de formação de trincas superficiais e internas. Como é possível verificar na literatura de Smirnov (1947), além de ter-se maior controle quanto ao escoamento do material, fica evidente o equilíbrio das forças de tensão e compressão geradas pelo processo.

O processo de fabricação exigido para adquirir este resultado é a partir da laminação por rolos, o qual confere maior produtividade e menor risco de apresentar descontinuidades no material para produzir a pré-forma do forjamento. A figura 18 exemplifica este processo:

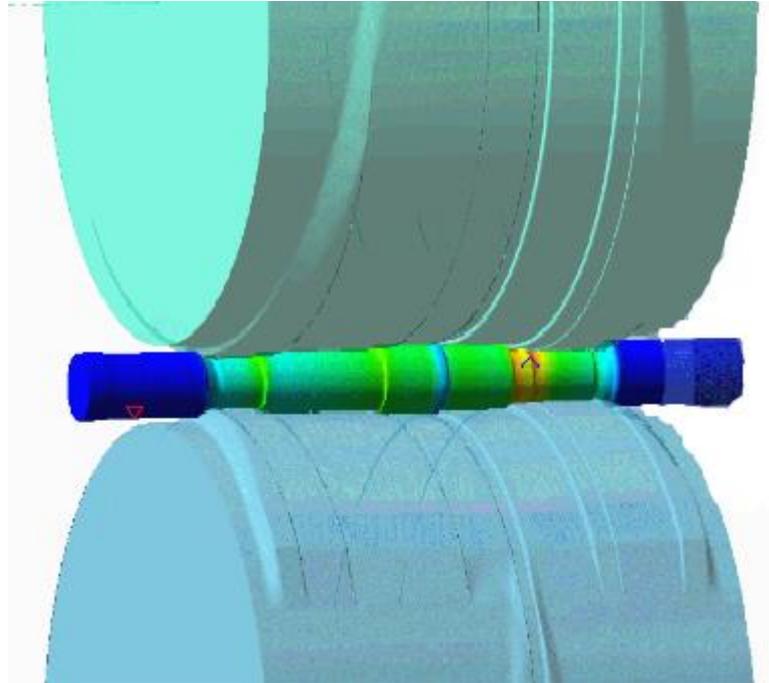


Figura 18 - Simulação do processo fabricação da pré-forma em rolos laminadores
Fonte: Figura interna da Empresa X

Após esse processo verifica-se que o tarugo se deforma a ponto que tenha o seguinte formato, representado na Figura 19:



Figura 19 - Pré-forma após passar pelo processo de laminação em rolos
Fonte: Figura interna da Empresa X

Considerando o processo do Fornecedor A, atualmente a segunda e terceira etapa do processo de forjamento em matriz fechada confere uma taxa de produção de uma peça por ciclo, conforme é possível ver na tabela 2:

Tabela 2- Representação das matrizes de forjamento nas etapas 2 e 3 do Fornecedor A
Fonte: Autoria própria (2016)

Fornecedor A	
Etapa 2	Etapa 3
Forjamento em matriz fechada	Forjamento em matriz fechada
	

Porém, já existem processos de forjamento disponíveis para produtos similares em que é possível dobrar esta taxa, e por isso, busca-se através deste projeto validar o fluxo de processos a seguir ilustrado pela figura 20 para o Fornecedor B.

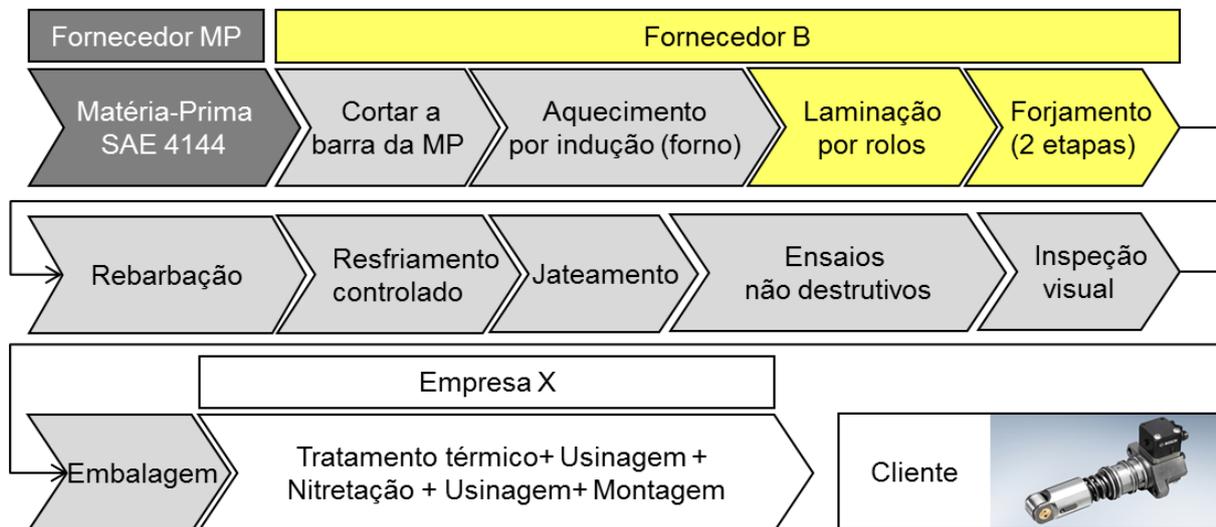


Figura 20 - Fluxo de processos para a manufatura do corpo da bomba injetora no Fornecedor B
Fonte: Autoria própria (2016).

Entre os ensaios não destrutivos empregados pelo Fornecedor B, pode-se mencionar: correntes parasitas, partículas magnéticas, e diferentemente do processo do Fornecedor A, adicionou-se o ensaio de ultrassom. Com isso, é possível garantir que, com a inspeção cem por cento de possíveis defeitos internos e superficiais, provenientes deste processo, haverá o fornecimento de peças apenas dentro do especificado.

A principal alteração no processo proposto foi a utilização da laminação por rolos, bem como a de duplicar a quantidade de peças forjadas em matriz fechada durante as duas etapas da operação.

Como é possível evidenciar na imagem computacional a seguir, após a laminação em rolos, o processo duplica a quantidade de peças por ciclo produzidas. Em outras palavras, a pré-forma resultante da laminação possibilita o forjamento de uma peça na parte superior e outra no inferior da sua linha central durante o processo em matriz fechada.

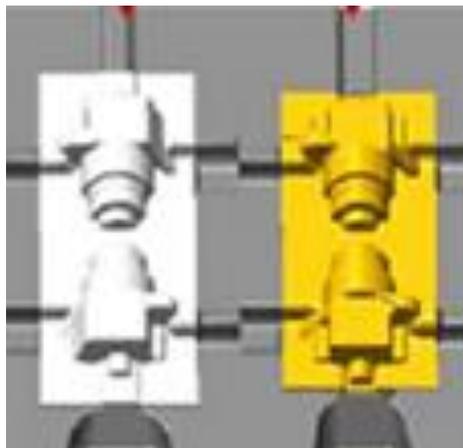


Figura 21 - Representação da matriz de forjamento do Fornecedor B com dupla cavidade
Fonte: Figura interna da Empresa X

Se considerarmos a laminação em rolos mais as duas etapas do forjamento em matriz fechada, ilustrativamente teremos:

Tabela 3 - Sequência das etapas dos processos de conformação do Fornecedor B
Fonte: Autoria própria (2016)

Fornecedor B		
Etapa 1 Laminação Em rolos	Etapa 2 Forjamento em matriz fechada	Etapa 3 Forjamento em matriz fechada
		

A matéria prima utilizada no corpo da bomba injetora diesel UP é a liga de aço SAE4144, que possui sua composição química conforme a tabela 4 a seguir:

Tabela 4 - Composição química do aço SAE 4144.
Fonte: Gerdau (2016).

Elemento	Especificado (%)
C	0,42-0,46
Si	0,20-0,30
Mn	0,90-1,00
P	Max 0,025
S	0,010-0,020
Al	0,015-0,040
Cr	1,15-1,30
Mo	0,25-0,35
Ni	Max 0,25
Cu	Max 0,35

3.3 Validação do novo processo

A validação do novo processo ocorreu em 2 etapas, sendo elas o PPAP e o teste de pulsação hidráulico de alta pressão.

Assim que o processo de fabricação no Fornecedor B foi completamente desenvolvido o PPAP foi submetido, tendo a possibilidade da confecção das amostras para tal. Abaixo seguem os requisitos à serem solicitados no PPAP de acordo com a 4ª edição do AIAG:

- Diagrama do fluxo de processo;
- FMEA de processo;
- Plano de controle;
- Estudo da análise dos sistemas de medição;
- Resultados dimensionais completo de 5 amostras;
- Capabilidade do processo (*short-term*);
- Produção de amostras;
- Amostra padrão no fornecedor;
- Folha capa (PSW);
- Lista de características críticas definida;
- Certificado de matéria-prima;
- Relatório de composição de material (IMDS);
- Exame de dureza e análise metalográfica para 4 amostras conforme indicado

na figura 22:

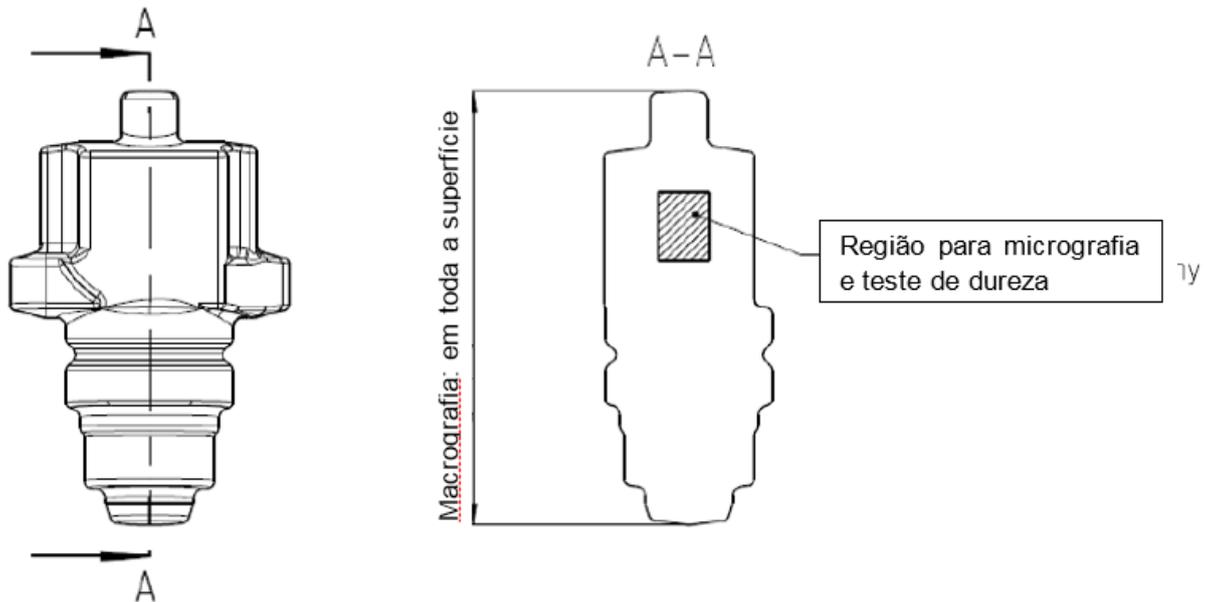


Figura 22 - Desenho esquemático do corpo forjado UP, indicando a região onde foi feito o exame de dureza e a micrografia na peça
Fonte: Figura interna da Empresa X

O PPAP foi então recebido pela Empresa X, a qual realizou a análise crítica da documentação recebida, assim como comparou os resultados do relatório de medição do Fornecedor B com os seus valores obtidos com o intuito de evitar uma diferença de 20% de medição para as características consideradas importantes. Esta comparação de medidas evita que haja um desacordo quanto aos resultados obtidos na inspeção de recebimento das peças de produção.

Tendo em vista o alto custo do teste de pulsação hidráulica de alta pressão, este só pôde ser realizado assim que a folha capa do PPAP (PSW) foi aprovada. Foram utilizadas 36 amostras do componente forjado e, portanto, foram fabricadas 36 bombas injetoras diesel UP.

3.3.1 Preparação para o teste de Pulsação Hidráulica de Alta Pressão

Conforme citado anteriormente no capítulo 2.8, os componentes necessários para o teste de pulsação hidráulica de alta pressão não incluem somente o corpo da bomba injetora UP, mas também o conjunto de todos os componentes montados, conforme ilustrado na figura 4.

Desta maneira, após a usinagem do corpo forjado e sequente montagem dos demais componentes, as amostras para o teste de validação foram embaladas apropriadamente antes de serem enviadas para o grupo de teste de pulsação, para que estas estivessem

protegidas de corrosão e impactos mecânicos, fatores que podem influenciar na falha do componente, e, assim como no cálculo da pressão permissível do produto. Se qualquer parte ou peça tivesse ataque de corrosão, ou danificação mecânica, esta provavelmente quebraria em uma baixa pressão ou tempo de ciclo, e, portanto, gerando resultados não confiáveis e insatisfatórios.

O equipamento utilizado para realização do teste foi um motor ciclo diesel conforme figura 23 representa a seguir:



Figura 23 - Motor ciclo diesel do teste de pulsação hidráulica de alta pressão.

Fonte: Autoria própria (2016)

Para que o teste seja realizado, é necessário que seja feita a parametrização do motor de modo que ele possa trabalhar em altas pressões. Outro detalhe importante é em relação ao fechamento do bico injetor. Como é desnecessário realizar a combustão do óleo diesel nesse tipo de teste de validação, seria um desperdício de combustível se o orifício do bico injetor não fosse tampado.

Como é possível verificar na figura 23, cada bomba injetora foi acoplada aos 6 cilindros existentes, onde ficaram sujeitas a pressões que variam senoidalmente de 0 à aproximadamente 3700 bar.

Para o corpo da bomba injetora foram realizadas três rodadas de testes para três pressões diferentes, em média 3200, 3400 e 3700 bar. Cada rodada de teste consistiu em 48 horas ininterruptas de amplitudes de pressões. O único momento em que o teste pode acabar antes é caso um dos corpos não suporte à fadiga e acabe falhando. Caso isso ocorra, automaticamente após o vazamento, transdutores instalados na linha de pressão, um no início e um no retorno, bloqueiam o sistema de injeção interna do sistema devido ao bloqueio de diferença de pressão entre estes.

Após a realização dos testes e do registro dos resultados, foi possível calcular a pressão permissível do corpo da bomba injetora. O cálculo da pressão permissível utilizar-se de um método estatístico, que foge ao escopo do trabalho apresentado, para identificar qual a pressão que, quando aplicada no componente, possui estatisticamente 50% de falha. Essa pressão é dividida pelo coeficiente de segurança para se obter, então, a pressão permissível. Com a prática dos ensaios de tantos anos para esse componente, é admitido que o valor do coeficiente de segurança é 1,51. Com isso, é necessário que a pressão permissível calculada seja maior que a pressão nominal aplicada no sistema quando montado no motor para garantir vida infinita do componente.

Como é um teste de fadiga, é esperado que os corpos da bomba injetora cheguem ao seu limite e falhem a uma determinada pressão.

3.3.2 Preparação das amostras

Depois de realizado o teste de fadiga, as peças do dispositivo de teste são retiradas e desmonta-se o corpo injetor dos demais componentes, para que se inicie a análise de falhas do componente.

Tendo em vista que geralmente as trincas provenientes do teste são completas, utiliza-se um microscópio óptico para localizar a região exata onde ela ocorreu. Na sequência, é necessário o corte do componente e o lixamento do corpo de prova até que se encontre corretamente a superfície fratura. Este passo é muito importante, pois uma avaliação errada da quantidade a ser cortada, ou lixada pode destruir a região que deveria ser analisada, ou influenciá-la, como por exemplo o encruamento da região do início da trinca que afetaria diretamente a qualidade da análise e os resultados.

Uma vez que a superfície de fratura esteja exposta, é realizada então a análise de microscópio eletrônico de varredura (MEV), onde através da visualização da peça com ampliação, procura-se o ponto de início de trinca.

A partir de exigências de qualidade da Empresa X, foram solicitadas que as peças tivessem as seguintes especificações, que posteriormente foram medidas e analisadas em testes laboratoriais ou em inspeções realizadas pelo cliente:

- Os defeitos de forjamento, incluindo trincas, dobras, sobreposição de material, não podem exceder 0,3 milímetros de profundidade, nem 12,5 milímetros de comprimento.
- O fornecedor deve controlar a velocidade de resfriamento do componente depois de forjado, de forma que evite a formação de trincas. Com a intenção de obter a dureza especificada (HB 320 máximo) e microestrutura perlítico lamelar (>60%) e o restante com microestrutura ferrítica e bainítica.
- A camada de descarbonetação superficial não pode superar a 0,15 milímetros para a descarbonetação total. Descarbonetação parcial não pode ultrapassar 1,0 milímetro.
- As possíveis microinclusões de óxidos encontradas no componente devem ter um diâmetro máximo de 0,035 milímetros.

3.3.3 Procedimento Laboratorial

Os procedimentos de análise no laboratório foram os seguintes:

- Recebimento de 4 amostras de corpos forjados devidamente desmontados dos seus componentes. As partes remanescentes dos corpos não foram avaliadas, apenas o corpo usinado;
 - Identificação da região onde se encontra a trinca no componente;
 - Após a identificação do local onde seria necessária a análise, foram feitos cortes no corpo usinado para que a trinca fosse destacada, possibilitando visualização da superfície fraturada;
 - 1º Corte do corpo usinado utilizando disco de corte de Ø230x2,0x32mm a aproximadamente 3550 RPM, utilizando o equipamento Struers Labotom 3, como mostra o exemplo da figura 24;



Figura 24 - Equipamento de corte equipamento Struers Labotom 3
Fonte: Struers

- Lixamento de uma das faces cortadas para a eliminação das rebarbas proveniente dos cortes realizados;
- Já seccionados os fragmentos, estes foram lavados com água e álcool etílico, e posteriormente secados para a sua oxidação;
- Para que finalmente fosse aberta a trinca, foi realizado o lixamento com lixa d'água 120 e equipamento Phoenix 2000;
- Após o fim do lixamento do canal, a trinca foi evidenciada, ou seja: ela atingia toda a interface entre um canal e outro dentro do corpo usinado. O fato da trinca ter aparecido é muito importante, pois assim não há influência da análise laboratorial na superfície de fratura.

3.4 Obtenção dos resultados

O produto principal deste projeto é realizar o desenvolvimento de um novo fornecedor, o qual possuirá um processo de fabricação mais robusto, com os riscos de qualidade significativamente reduzidos, e preço-peça reduzidos, com maior taxa de produção e menor custo hora-máquina utilizado. Desta maneira, tem-se como chance principal para a obtenção destes resultados, a alteração do processo que antecede o forjamento em matriz fechada.

Após a definição do processo de fabricação que foi aplicado ao Fornecedor B, foi possível, através da análise de redução de custos (*Cost-Breakdown*), avaliar os ganhos econômicos. Além disto, foi realizada a comparação da análise de falha dos componentes

dos dois fornecedores de fornecimento pelo teste de pulsação hidráulico de alta pressão, no qual há a possibilidade de comprovar a melhoria de desempenho do componente.

4. Resultados

4.1 Validações

4.1.1 Teste de pulsação hidráulica de alta pressão

Após aberta a região da fratura para os quatro casos, foi possível iniciar a análise microscópica, foi utilizada ampliação de 34x até 1.200x para verificação da microestrutura, como pode ser visto nas figuras 25 e 26.

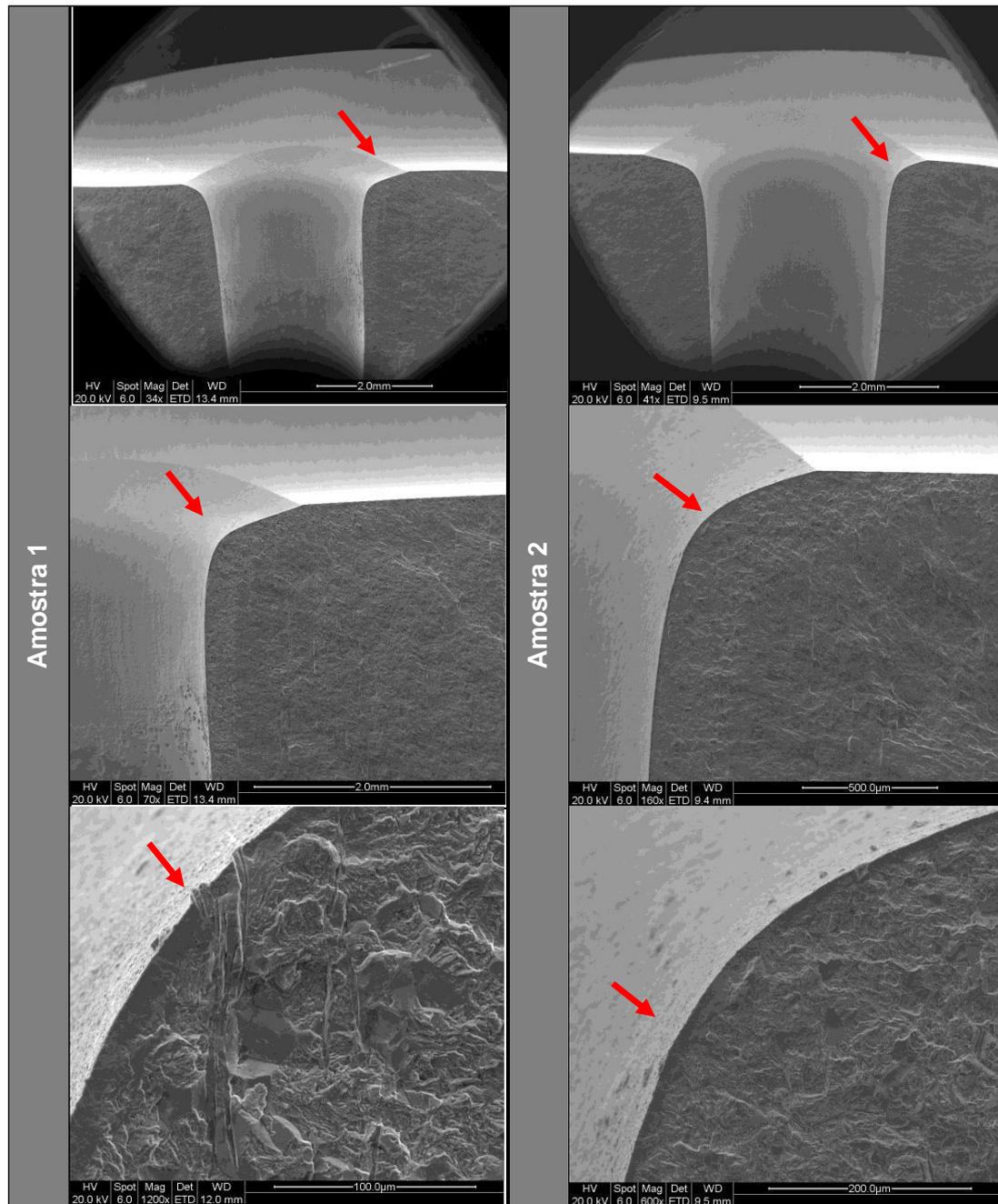


Figura 25 – Indicação do início da fratura do corpo forjado para as amostras 1 e 2
Fonte: Autoria própria (2016)

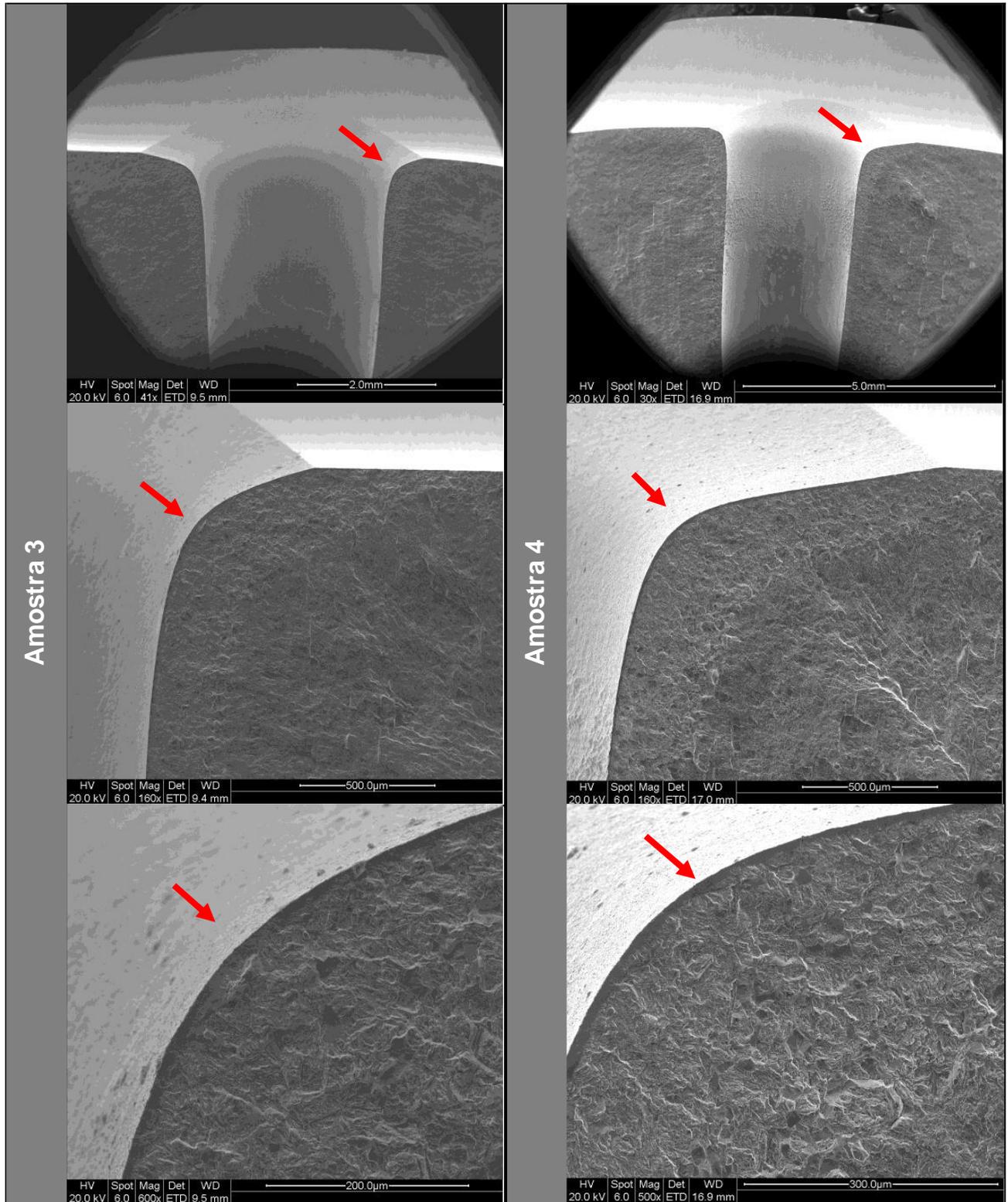


Figura 26 - Indicação do início da fratura do corpo forjado para as amostras 3 e 4
Fonte: Autoria própria (2016)

Avaliando a morfologia da superfície das quatro amostras, ainda que na região de início de fratura não tenham sido identificadas estrias de fadiga nem marcas de praia, haja

vista a condição do material não possibilitar a formação das mesmas (material temperado e revenido), tal fato não descarta a ocorrência do processo de fratura por fadiga.

Suspeita-se que as trincas das quatro amostras iniciaram a partir de inclusão não metálica de MnS pois foi verificado que podem existir inclusões de MnS neste material, haja vista que a matéria prima utilizada, que possui ambos componentes S e Mn na composição química, como pode ser visto na tabela 4. Além disso, tem-se por histórico do componente, que a região mais provável para a falha por fadiga é a da interseção do furo de alta pressão com o furo da válvula, conforme indicado nas setas das figuras 25 e 26.

Uma vez realizada a análise microscópica do material, foi feita a análise da composição química da área suspeita de início das trincas através da Espectroscopia Dispersiva de Energia (EDS). Assim, foram encontrados os seguintes resultados (tabela 5), confirmando-se concentração dos componentes Mn e S, o que contribui com a suspeita da presença de inclusões.

Tabela 5 - Fração mássica de elementos em cada uma das amostras analisadas.
Fonte: Autoria própria (2016)

Elemento [%] Fração mássica	C	S	Cr	Mn	Fe	Ni
Amostras 1	2,05	14,78	3,23	33,73	45,76	0,45
Amostras 2	6,68	19,22	1,33	28,74	43,89	0,14
Amostras 3	5,01	17,32	2,34	38,42	36,65	0,26
Amostras 4	6,18	13,32	1,51	20,76	58,06	0,17

A figura 27 representa o formato usual de resultado utilizando o EDS:

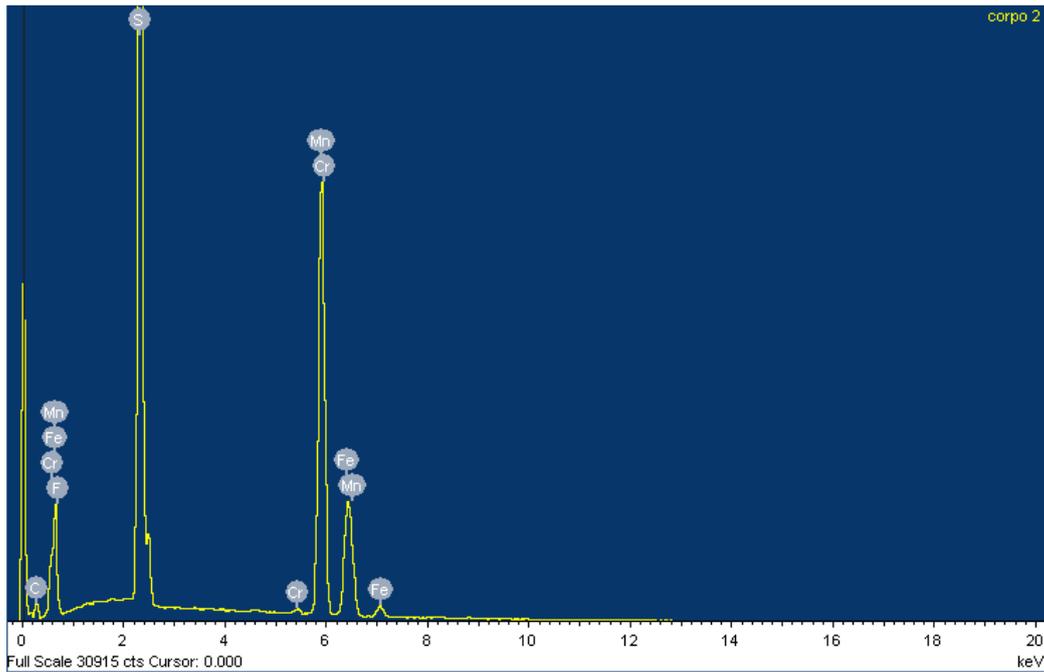


Figura 27 - Resultado da composição química obtida pelo EDS
Fonte: Autoria própria (2016)

Referente à possibilidade de inclusões de MnS no material, e qual seria a sua morfologia, através de microscopia óptica com ampliação de 100x foi possível observar nas amostras, em diversos locais espalhados, estruturas que aparentam ser inclusões de MnS encontradas nas amostras de 1 a 4, conforme as figuras 28 a 31.

Adicionalmente, é possível verificar que o formato alinhado das inclusões de MnS são resultantes do processo de forjamento, o qual escoava o material majoritariamente de forma ordenada e, portanto, resulta quase que sempre em fibras paralelas entre si. Este efeito é possível de ser verificado na seção 4.1.3.

Com a análise das figuras também é possível verificar que as dimensões das inclusões não ultrapassam o limite estipulado pelo cliente que é de 0,035 milímetro. Este requisito baseia-se na norma ASTM E-45 - Método "C" ou "D", o qual define, para este componente, a classificação das inclusões de 0 a 4.



Figura 28 - Inclusões de MnS
Fonte: Autoria própria (2016)



Figura 29 - Inclusões de MnS
Fonte: Autoria própria (2016)



Figura 30 - Inclusões de MnS
Fonte: Autoria própria (2016)



Figura 31 - Inclusões de MnS
Fonte: Autoria própria (2016)

Com isso, pode-se concluir que as amostras atenderam aos requisitos estipulados pelo cliente em relação à dimensão das inclusões, de modo que o componente possua as propriedades mecânicas desejadas no projeto.

4.1.2 Análise Metalográfica

O texto da prescrição ao respeito dos requisitos de fabricação do material forjado, solicita perlita lamelar maior igual à sessenta por cento ($\geq 60\%$) com ferrita e bainita remanescentes.

A seguir os resultados da análise de duas amostras, que evidenciam a aprovação do material para este quesito, são ilustradas pelas figuras 32 e 33:

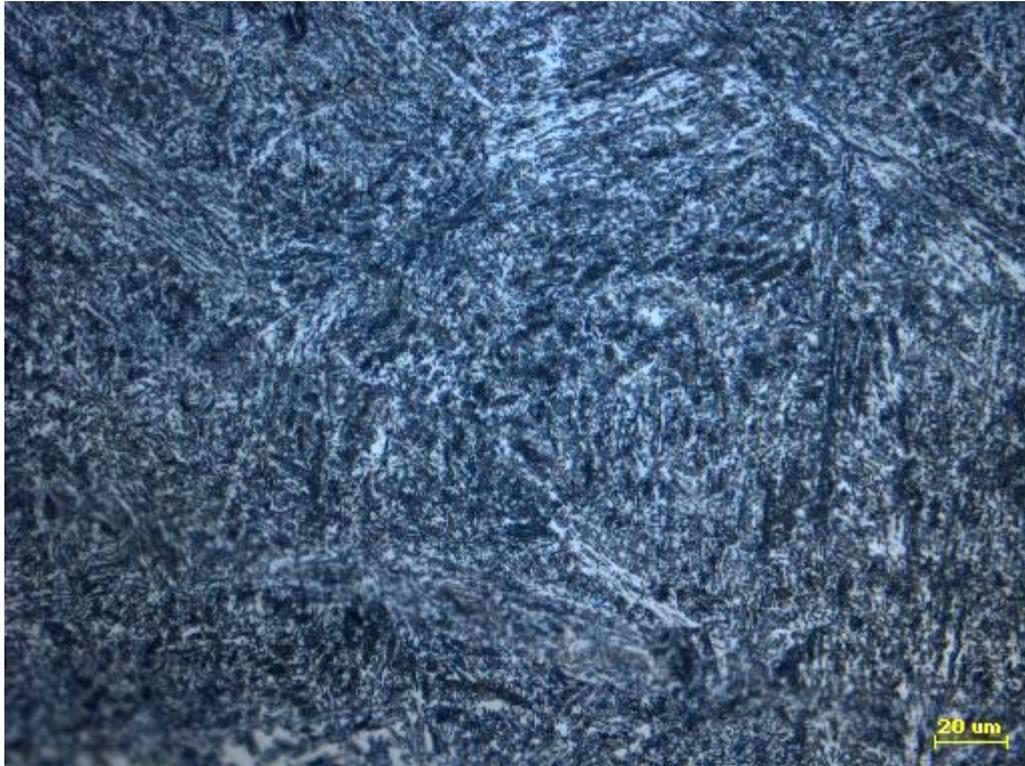


Figura 32 - Análise metalográfica da amostra 1
Fonte: Autoria própria (2016)

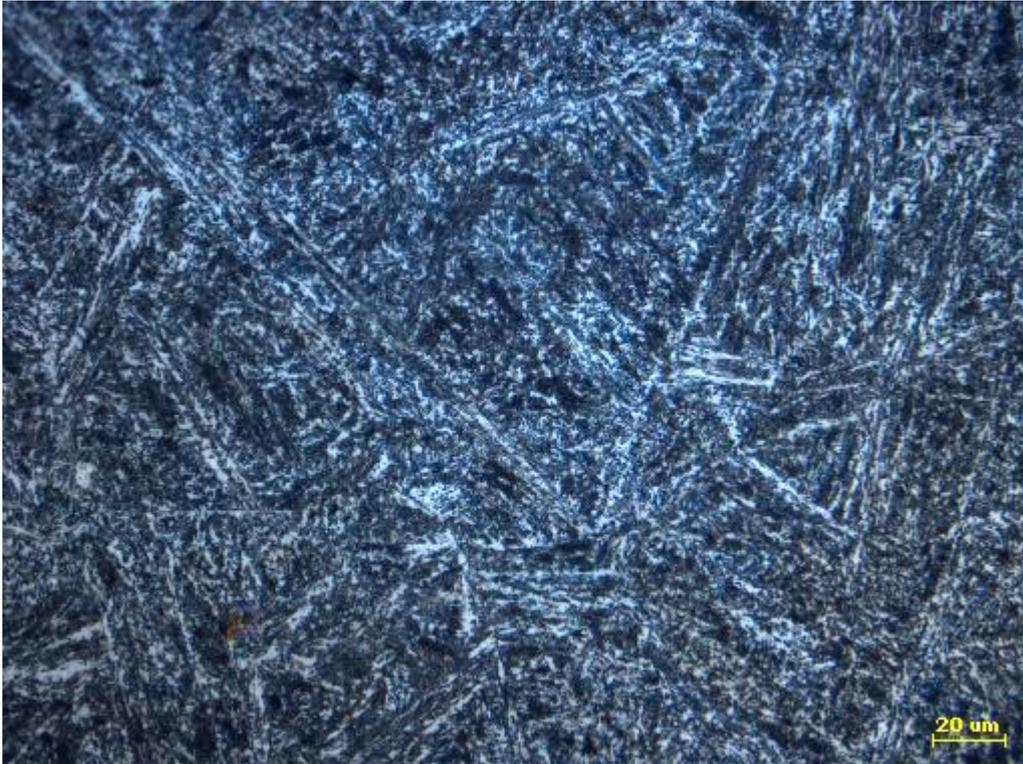


Figura 33 - Análise metalográfica da amostra 2
Fonte: Autoria própria (2016)

4.1.3 Fibramento

Para a análise de fibramento do componente, foi seccionada uma amostra do Fornecedor A e uma amostra do Fornecedor B conforme o plano longitudinal a seguir da figura 34:



Figura 34 - Seção do corte do componente para a análise do fibramento.
Fonte: Autoria própria (2016)

A imagem com o comparativo dos resultados é representada pela figura 35:

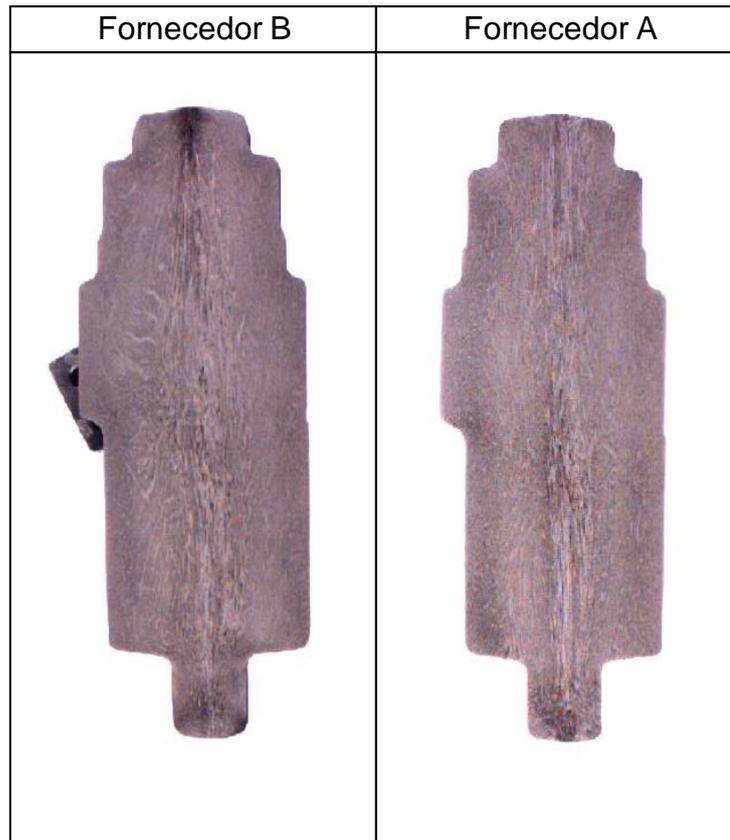


Figura 35 - Orientação das fibras dos componentes do fornecedor B (esquerda) e do fornecedor A (direita).

Fonte: Autoria própria (2016)

Ambos resultados são condizentes ao processo de fabricação implementado, o qual caracteriza-se pela presença de fibras ortogonais e paralelas após o forjamento em matriz fechada.

Para a figura do Fornecedor B entretanto, é possível verificar a presença de pequenas cavidades no interior da peça (regiões mais escuras) provenientes do efeito Mannesmann e características do processo de laminação em rolos.

4.1.4 Dureza

A análise de dureza superficial considerou a região onde houve um maior escoamento do material durante o processo de forjamento, e, portanto, a mais suscetível aos valores fora do especificado. A região utilizada para avaliar a dureza do material é mostrada na figura 22.

Oito amostras foram realizadas para a medição da dureza superficial e de núcleo com todos os resultados dentro do especificado de valor máximo de 320 HB. Para cada amostra, foi realizada a indentação de 3 pontos ao longo da região determinada, e sequencialmente

a média das durezas foram calculadas para uma representatividade mais fiel da dureza. A seguir os resultados conforme a tabela 6. O método de medição utilizado foi o Brinell (HB)

Tabela 6 - Resultado da medição de dureza Brinell (HB) em oito amostras.
Fonte: Autoria própria (2016)

Corrida	Dureza (HB)	
	Superficial	Núcleo
Inicial	298-306-298-300	296-304-293-297
Final	305-309-302-305	302-304-299-300

4.1.5 Descarbonetação

O texto da prescrição do cliente estabelece que a camada de descarbonetação parcial não deve exceder 1,0 mm.

Especificado em norma, um exemplo de como deve aparentar a peça quando sofre descarbonetação é ilustrada pela figura 36:

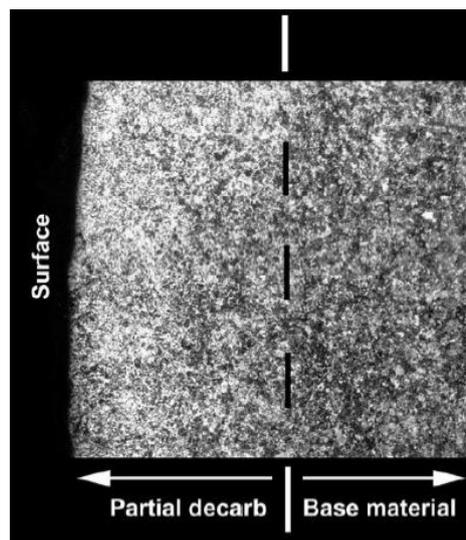


Figura 36 - Representação da descarbonetação parcial em relação ao material base.
Fonte: Figura interna da Empresa X

Para a primeira amostra, constatou-se uma descarbonetação parcial com 0,193 mm de profundidade e para a segunda amostra uma descarbonetação parcial com 0,166 mm de profundidade, conforme é possível visualizar nas figuras 37 e 38. Desta maneira, ambas estão aprovadas, pois ficaram dentro do especificado de uma profundidade máxima de descarbonetação de 1,0 mm.

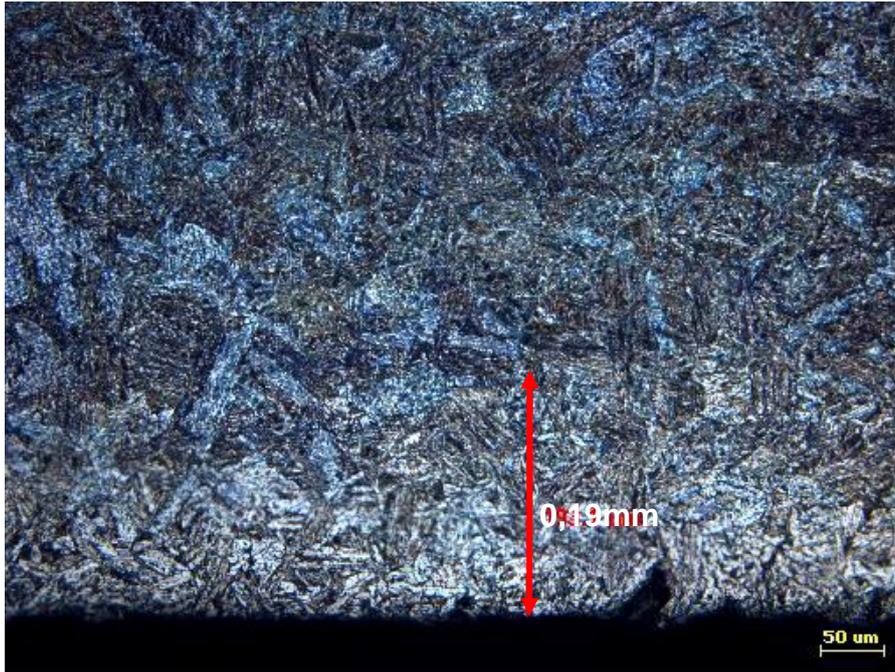


Figura 37 - Análise descarbonetação parcial.
Fonte: Autoria própria (2016)

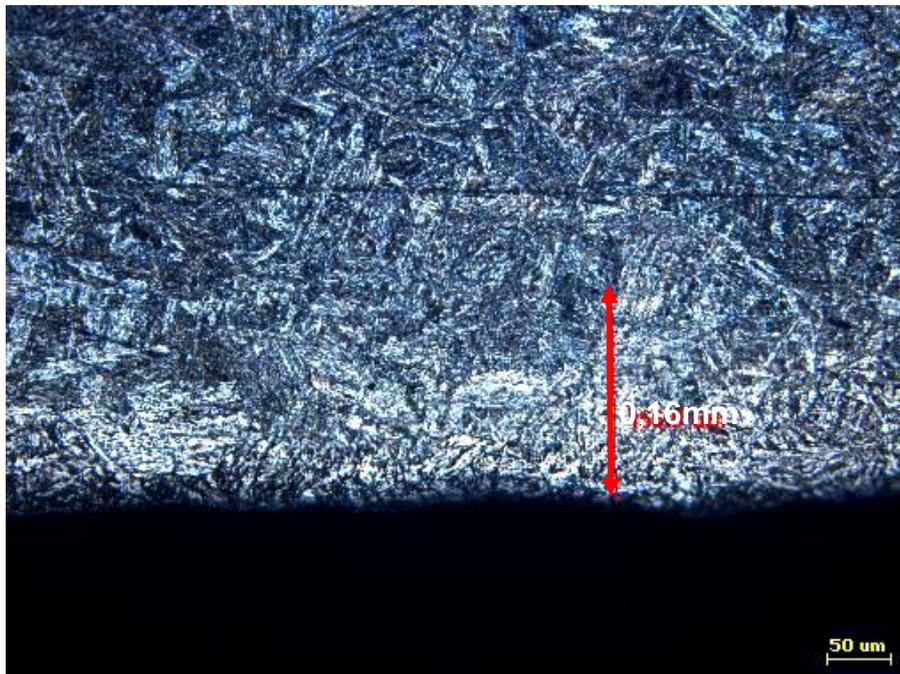


Figura 38 - Análise descarbonetação parcial
Fonte: Autoria própria (2016)

4.1.6 PPAP

Os resultados de PPAP foram considerados satisfatórios, já que estavam de acordo com todos os requisitos exigidos e conforme a 4ª edição segundo a AIAG.

Na visão da qualidade, todos os documentos apresentaram-se de acordo com o especificado sem que houvesse qualquer desvio a ser corrigido ou modificado pelo fornecedor.

As informações do PPAP recebidas do Fornecedor B são sigilosas, e portanto não são retratadas com detalhe neste trabalho. De qualquer forma, a seguir são mostrados na tabela 7 os documentos solicitados, bem como os recebidos pelo fornecedor B e sua conformidade.

Tabela 7 - Representação da matriz de documentos requeridos pelo cliente no PPAP, documentos enviados pelo fornecedor e o resultado da avaliação de cada um deles.

Fonte: Autoria própria (2016)

No.	Requerimentos de acordo com o PPAP 4a edição (AIAG)	Solicitado ao fornecedor		Submetido pelo fornecedor		Aprovado	
		s (Sim)	n (Não)	s	n	OK	NOK
1	Documentação técnica	X		X		X	
5	Diagrama de fluxo de processo	X		X		X	
6	FMEA de processo	X		X		X	
7	Plano de controle	X		X		X	
8	Estudos de análise dos sistemas de medição	X		X		X	
9	Resultado dimensional	X		X		X	
11	Capabilidade do processo (<i>short-term</i> ; $Cpk > 1,67$) para as características importantes	X		X		X	
14	Produção de amostras para os testes de validação	X		X		X	
15	Amostras de controle no fornecedor (<i>Master Sample</i>)*	X		X			
18	Folha capa (<i>Part Submission Warrant - PSW</i>)	X		X		X	
22	Lista das características importantes	X		X		X	
23	Certificado do material	X		X		X	
24	Relatório da composição química no IMDS (<i>International Material Data System</i>)	X		X		X	
26	Formulário de embalagem	X		X		X	

* O fornecedor deve reter uma amostra de controle pelo mesmo período até que o processo de aprovação do componente junto ao cliente se finalize.

4.2 Ganhos processuais e econômicos

A seguir são apresentados os resultados, na tabela 8, da implementação do processo do Fornecedor B em termos econômicos, taxa de produção e tempo de retorno do investimento realizado.

Tabela 8 – Análise quantitativa do projeto
Fonte: Autoria própria (2016)

Impacto	Unidade	Quantidade
Aumento da taxa de produção do componente forjado	%	+19,4%
Redução no valor de venda do componente comprado	%	-14,2%
Estimativa de tempo de retorno do custo investido no projeto (<i>payback</i>)	meses	4,5

5. Conclusão

Por tudo que foi exposto, pode se concluir que a implementação da laminação em rolos, bem como melhorias no forjamento em matriz fechada no fornecedor alternativo, trouxeram melhorias contundentes ao processo anteriormente empregado pela Empresa X. Evidenciou-se um ganho significativo na taxa de fabricação e conseqüente redução no preço de venda do componente que até então era fornecido apenas pelo Fornecedor A. Além de reduzir a dependência entre cliente e fornecedor, o PPAP foi aprovado sem quaisquer restrições e o resultado do teste de pulsação hidráulica de alta pressão, se comparados ao histórico de amostras do Fornecedor A, apresentou uma pressão de trabalho permissível máxima ainda maior.

6. Referências

- AIAG. (2006). *Production Part Approval Process (PPAP) 4th Edition*. The Automotive Industry Action Group.
- ALTAN, T., NGAILE, G., & SHEN, G. (2005). *Cold and Hot Forging - Fundamentals and Application*. Ohio: ASM International.
- ANFAVEA. (2016, Abril 02). *Estatísticas*. Retrieved from Site da ANFAVEA: <http://www.anfavea.com.br/a-anfavea.html>
- BENNETT, S. (2009). *Modern Diesel Technology: Diesel Engines*. Delmar NY: Cengage Learning.
- BERTOTTI, G. (1985). Physical interpretation of eddy current losses in ferromagnetic materials. I. Theoretical considerations. *Journal of applied Physics*, p. 2110-2117.
- BUTTON, S. T., & GENTILE, F. C. (2001). Estudo do processo de Cross-Wedge Rolling para a produção de eixos escalonados com aços microligados.
- CHIAVERINI, V. (1986). *Tecnologia Mecânica - Processos de Fabricação*. São Paulo: McGraw.
- CHIAVERINI, V. (2012). *Aços e Ferros Fundidos (7ª ed.)*. São Paulo: ABM.
- CORRÊA, F. J., DA COSTA, L. d., & SCHAEFFER, L. (2014). Emprego do ultrassom em produtos forjados para verificação de descontinuidades. *FORGE*.
- DANNO, A., & TANAKA, T. (1984). Hot forming of stepped steel shafts by wedge rolling with three rolls. *Journal of Mechanical Working Technology*, 21-35.
- GENTE, A., & BURGER, C. (2010). *Estados Unidos Patent No. US 9193000 B2*.
- GHOSH, A., DAS, S., CHATTERJEE, S., MISHRA, B., & RAO, P. (2003). Influence of thermomechanical processing and different post-cooling techniques on structure and properties. *Materials Science and Engineering*, 299-308.
- JOHNSON, W., & MAMALIS, A. G. (1977). A survey of some physical defects arising in metal working processes. *Proceedings of the Seventeenth International Machine Tool Design and Research Conference*, (pp. 607-621). Macmillan Education UK.
- LEE, Y., PAN, J., HATHAWAY, R., & BARKEY, M. (2005). *Fatigue Testing and Analysis (Theory and Praxis)*. Butterworth-Heinemann, Boston, USA: Elsevier.
- LOVEJOY, M. J. (2012). *Magnetic particle inspection: a practical guide*. Springer Science & Business Media.
- MARQUARDT, C. (2015). *Performing and Evaluating Wöhler Tests of Internally Pressurized Components*. Stuttgart: Testing Handbook.
- MARQUARDT, C., SCHEFFOLD, A., & WEIHING, H. (2009). *Limit Cycle Numbers in Pulse Testing*. Feuerbach: Testing Handbook.
- NORTON, R. (2013). *Projeto de Máquinas (4ª ed.)*. Bookman Editora.
- RODRIGUES, J., & MARTINS, P. (2005). *Tecnologia da deformação plástica (Vol. II)*. Portugal: Escolar Editora.
- SCHAEFFER, L. (2001). *Forjamento – Introdução ao processo*. Porto Alegre: Imprensa Livre.

SCHEFFOLD, A., & WEIHING, H. (2011). *Execution and Evaluation of Fatigue Tests under operational Conditions*. Feuerbach: Testing Handbook.

SMIRNOV, V. S. (1947). The deformation process in cross rolling. *Stal*, 511-520.

SPIES, M., & RIEDER, H. (2010). Synthetic aperture focusing of ultrasonic inspection data to enhance the probability of detection of defects in strongly attenuating materials. *NDT & E International*, p. 425-431.

TOTTEN, G., HOWES, M., & INOUE, T. (2002). *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. Ohio: ASM Internacional.

WEROŃSKI, W., & PATER, Z. (1992). Selection of geometric parameters of transverse wedge rolling tools. *Journal of materials processing technology*, 273-280.

WHITELAW, J. H., PAYRI, F., ARCOUMANIS, C., & DESANTES, J. M. (2002). *Thermo- and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines*. Valencia: Springer.