

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

ISABEL CRISTINA GOMES

ANÁLISE DE FALHA EM COMPONENTE DE MOTOR VEICULAR

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2019

ISABEL CRISTINA GOMES

ANÁLISE DE FALHA EM COMPONENTE DE MOTOR VEICULAR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Roger Navarro Verastegui

PONTA GROSSA

2019



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Ponta Grossa

Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Informática
Bacharelado em Ciência da Computação



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DE FALHA EM COMPONENTE DE MOTOR VEICULAR

por

ISABEL CRISTINA GOMES

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 5 de dezembro de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Roger Navarro Verastegui
Orientador

Enga. Ma. Bianca Marin
Membro Titular

Prof. Dr. Denilson José Marcolino de Aguiar
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares

Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de Carvalho

Coordenador do Curso

AGRADECIMENTOS

Meu primeiro agradecimento é direcionado a Deus, pois sem ele jamais teria conseguido chegar até aqui. O agradeço por ter me proporcionado a convivência por um ano junto a minha tia Maria Odete, na qual foi um anjo em minha vida, me apoiando em todos os momentos difíceis do início do curso. Agradeço pela vida dos meus pais Nadir Gomes e Maria Ione Kutchma, e ao meu Irmão Israel Gomes, que me apoiaram em oração. Ao meu namorado Henry Lucas, aos meus amigos Matheus Claro De Oliveira, Julia Luise Carneiro e Shayemme Pontes, pela força em toda essa correria que foi meu último ano.

Agradeço pela empresa que me abriu as portas, para a realização do meu trabalho de conclusão de curso, parte do meu sonho de caloura, se tornou realidade. Ao meu Orientador, Prof. Dr. Roger Navarro Verastegui e Coorientador Prof. Dr. Rodrigo Villaca Santos, que me orientaram com sabedoria durante toda essa trajetória.

Enfim, agradeço por todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho.

RESUMO

GOMES, Isabel Cristina. **Análise De Falha Em Componente De Motor Veicular**. 2019. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado, em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

Atualmente eles vêm sendo largamente utilizados, principalmente no setor automotivo. Nesse setor, essas ligas são aliadas ímpares para a obtenção de uma melhor performance veicular. O processo de fabricação para obtenção de peças para esse setor pode ir desde a metalurgia do pó, conformação, usinagem e fundição sob pressão. O objeto de estudo neste trabalho, foi com base em uma peça do setor automotivo em alumínio, fabricado por injeção sob pressão, que apresentava falha durante um processo de conformação no qual a mesma era submetida. Através da realização de simulação via Ansys®, ensaio metalográfico, ensaio MEV e ensaio Vickers, pode-se concluir que no processo de resfriamento da liga havia o surgimento de intermetálicos do tipo α , sendo os mesmos considerados extremamente duros. Também por esse viés, foi visto que no processo de conformação havia uma concentração de tensão na região da dobra, apontada na simulação, fazendo com que houvesse um aumento significativo no número de discordâncias. Como os intermetálicos são frágeis, pode-se concluir que o processo de falha se inicia nos mesmos.

Palavras-chave: Liga SAE 306. Injeção sob pressão. Intermetálico fase α . Metalografia alumínio.

ABSTRACT

GOMES, Isabel Cristina. **Failure Analysis in Engine Component**. 2019. 53 p. Work of Conclusion Course (Graduation in Mechanical Engineering) - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2019.

Currently they have been widely used, mainly in the automotive industry. In this sector, which ones are special allies for better vehicle performance. The manufacturing process for obtaining parts for this industry can range from powder metallurgy, forming, machining and die casting. The object of study in this work was based on a part of the aluminum car industry, manufactured by pressure injection, that failed during a forming process in which it was submitted. Through the simulation of Ansys®, metallographic test, MEV test and Vickers test, it can be concluded that in the alloy cooling process there was the emergence of type α intermetallic, being considered extremely hard. Also from this bias, it was seen that in the forming process there was a tension concentration in the bending region, pointed in the simulation, causing a significant increase in the number of disagreements. As the intermetallic particles are fragile, it can be concluded that the failure process starts in them.

Keywords: Alloy SAE 306. Pressure Injection. Intermetallic phase α . Aluminum metallography.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Formação da microestrutura SAE 306.....	18
Figura 2 - Processo de fundição sob pressão em câmara fria	19
Figura 3 - Representação do raio mínimo	23
Figura 4 - Fórmula do Raio mínimo.....	23
Figura 5 - Estágio de uma fratura dúctil taça e cone	25
Figura 6 - Superfície de fratura frágil	26
Figura 7 - Ensaio Vickers	30
Figura 8 - Verificação da dureza em Rockwell	31
Figura 9 - Comparativo entre microscópio óptico e MEV	32
Figura 10 - Ensaio não destrutivo	33
Figura 11 - Elemento axissimétrico	35
Figura 12 - Componente do coxim que apresenta defeito.....	36
Figura 13 - Amostras cortadas	37
Figura 14 - Amostra dobrada.....	38
Figura 15 - Dimensão da espessura retirado do desenho 3D	38
Figura 16 - Realização de ensaio via MEV	39
Figura 17 - Elementos de malha tipo Plane 183.....	41
Figura 18 - posicionamento dos components para realização da simulação	42
Figura 19 - Amostras longitudinais.....	43
Figura 20 - Amostras transversais.....	43
Figura 21 - Peça fraturada	44
Figura 22 - Composição química Amostra 0	45
Figura 23 - Composição química Amostra 2	45
Figura 24 - Amostra 0 e 2 a resolução de 2000x.....	46
Figura 25 - Composição química dos precipitados desconhecidos amostra 0	47
Figura 26 - composição química dos precipitados desconhecidos amostra 2.....	47
Figura 27 - Durezas Vickers representada nas amostras	48
Figura 28 - Simulação nas tensões de 14kN, 35kN, 56kN e 70kN.....	50
Figura 29 - Peça pós simulação indicando a parte que sofre maior tensão	50
Figura 30 - Obtenção do raio de dobra via ImageJ	52
Quadro 1 - Elementos da composição química do Alumínio 306.....	17
Quadro 2 - Classificação dos ensaios destrutivos.....	27
Quadro 3 - Classificação dos ensaios não destrutivos.....	33
Tabela 1 - Tabela de Composição Química SAE 306	16
Tabela 2- Tabela de fator de correção para obtenção do raio mínimo	24

Gráfico 1: Gráfico de dispersão das durezas em HV	49
Gráfico 2: Tensão aplicada em função do deslocamento.....	51

LISTA DE SIGLAS

SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
Si	Silício
Cu	Cobre
Fe	Ferro
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
Zn	Zinco
Al	Alumínio
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
α	Alfa
NBR	Normas brasileiras
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
EDS	Espectroscopia por dispersão de energia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS.....	14
1.1.1 Objetivo geral	
Erro! Indicador não definido.	
1.1.2 Objetivos específicos	
Erro! Indicador não definido.	
1.2 JUSTIFICATIVA.....	14
2 ANÁLISE DE FALHA EM COMPONENTE DE MOTOR VEICULAR	16
2.1 LIGAS DE ALUMÍNIO	16
2.1.1 Liga SAE 306.....	17
2.2 INJEÇÃO DE ALUMÍNIO SOB PRESSÃO	18
2.2.1 Defeitos de injeção	20
2.2.1.1 Problemas no molde	20
2.2.1.2 Problemas metalúrgicos na liga fundida	21
2.2.1.3 Problemas no fluxo de calor.....	21
2.3 CONFORMAÇÃO MECÂNICA	21
2.3.1 Raio mínimo de dobra.....	22
2.4 CONCEITOS SOBRE MECÂNICA DA FRATURA.....	24
2.4.1 Fratura dúctil.....	24
2.4.2 Fratura frágil.....	25
2.5 ENSAIOS MECÂNICOS	26
2.5.1 Destrutivos	27
2.5.1.1 Metalografia	27
2.5.1.2 Dureza	29
2.5.1.2.1 <i>Vickers</i>	30
2.5.1.2.2 <i>Rockwell</i>	31
2.5.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura	31
2.5.2 Não destrutivos	32
2.5.2.1 Ensaio visual.....	33
2.6 ELEMENTOS FINITOS.....	34
2.6.1 Sólido Axissimétricos	34
2.6.1.1 Elementos de Malha	35
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	36
3.1 CORPOS DE PROVA.....	36
3.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL	39
3.2.1 Ensaio MEV	39
3.2.2 Ensaio Metalográfico	40
3.2.3 Ensaio de Microdureza	40
3.3 ANÁLISE NUMÉRICA.....	40

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1 METALOGRAFIA.....	42
4.2 MEV/EDS	
ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.	
4.3 DUREZA VICKERS.....	48
4.4 ANÁLISE NUMÉRICA.....	49
4.5 RAIO MÍNIMO.....	51
CONCLUSÃO	53
REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

O setor de transportes está entre um dos maiores consumidores de ligas de alumínio, visto que em muitos componentes dos motores, hoje são fabricados com este material. O alumínio foi trazido para o setor de automóveis, com o intuito de redução de massa veicular e desde então, o mesmo vem sendo utilizado em larga escala, em componentes, tais como: chassi, suspensão, direção e *powertrain* (ABAL, 2017).

O alumínio e suas ligas, são fortes aliados quando falamos em alta performance veicular, visto que os mesmos possuem baixa densidade e alta capacidade de absorção de energia. Essas características, tornam o veículo mais sustentável, pois terão maior economia e menor poluição, comparado aos modelos antigos, que se utilizam do aço (FILLETI, 2010).

A peça que será foco do trabalho, é fabricada em alumínio injetado, com processos adicionais de manufatura, tais como jateamento com granalha de aço, vulcanização de borracha em áreas específicas, sendo o último processo a etapa de conformação, para se ter a peça final. A mesma é um componente do sistema de apoio do motor, denominada coxim, uma de suas funções é evitar transferência de vibração do motor chegue até o veículo, tornando-se desconfortável aos ocupantes.

As peças de alumínio utilizadas nos veículos automotores, podem ser fabricadas por processos como; conformação, usinagem e injeção sob pressão. Dentre a gama de processos, o que é tido como principal parâmetro de escolha, é o custo da obtenção da peça, como o tempo de manufatura. Entre os principais processos de fabricação, hoje a injeção sob pressão é o que proporciona menor gargalo no processo de fabricação, pois produz peças seriadas com o menor tempo de processo de produção, comparada aos outros métodos (CHIAVERINI, 1986).

O processo de injeção sob pressão tem como principais características a produção de peças seriadas praticamente acabadas, com geometria complexa, tolerâncias dimensionais mais estreitas, e utilizando a mesma matriz, para grandes quantidades de peças. O mesmo pode ser realizado por câmara quente ou fria, sendo o de câmara quente o processo de injeção de alumínio. (MALAVAZI, 2005)

As principais causas de falha com as peças produzidas pelo processo de fundição sob pressão, podem ser devidos os parâmetros da injeção, ao molde ou à liga fundida. Na injeção podem ser relacionados com os gradientes térmicos,

velocidade e ciclo de injeção. Já no ferramental, o defeito pode se dar por desmoldante insuficiente e/ou baixa qualidade do acabamento superficial do molde, que pode influenciar na peça final. Já a liga fundida, pode apresentar alteração na sua composição química molecular, afetando a microestrutura da peça (MITTERER, 2000).

Baseado na montagem de peça para o setor automotivo de uma indústria multinacional, foi realizado uma análise de falha em uma peça injetada em alumínio com componente de borracha nas extremidades. A borracha é inserida sob pressão na peça de alumínio, tendo em uma das extremidades, a ocorrência de falha, por meio de trincas superficiais, que afetam o funcionamento da peça.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a causa da falha no coxim, apontando os pontos de melhorias no processo, para correção da não conformidade, seja ela na matéria prima, parâmetros de montagem ou molde.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Avaliar a microestrutura da peça falhada
2. Verificar através de simulação via Ansys¹, o local onde ocorre a maior tensão, e verificar quais são as partes mais suscetíveis a falhas.
3. Avaliar as partes mais suscetíveis a falhar.

1.3 JUSTIFICATIVA

O componente automotivo analisado, é uma peça de grande importância para o veículo, visto que a mesma é responsável por sustentar o motor a carroceria, traz também maior conforto e segurança para os usuários. Quando o coxim falha durante o uso, a vibração causada pelo motor é transferida para o veículo, que

¹ Ansys © 2019 R2

consequentemente se expor ao usuário, sendo a mesma maléfica para a saúde do indivíduo.

Atualmente não há bibliografias específicas, que relacionem falha em coxim, sendo está, uma contribuição acadêmica e para a indústria. Outro ponto de grande relevância, é que a indústria automotiva tem usado, o alumínio; para manter a competitividade, há uma estimativa que em 2025, os carros norte-americanos, se utilizem de 50 kg a mais de alumínio que em 2015 (DRIVEALUMINUM, 2015). Acredita-se que uma análise sobre falhas em peças fabricadas em alumínio por injeção sob pressão, possa contribuir para o desenvolvimento e melhoria desse processo, especialmente para aplicações em peças automotivas, que são itens de segurança.

Com base nesta análise, o trabalho é justificável, contribuindo com informações uteis para correções de falhas sejam elas atribuídas a matéria-prima ou parâmetros de processo.

Ainda neste contexto, custos podem ser otimizados pelo maior aproveitamento de peças e redução de retrabalhos.

2 ANÁLISE DE FALHA EM COMPONENTE DE MOTOR VEICULAR

O seguinte capítulo irá apresentar uma revisão da literatura necessária para o entendimento do estudo deste trabalho.

2.1 LIGAS DE ALUMÍNIO

O alumínio é um metal leve, que apresenta boa condutividade térmica e elétrica e, com a adição de elementos como silício, cobre, manganês, magnésio, cromo, zinco e ferro o alumínio tem algumas propriedades melhoradas (ABAL, 2017).

O alumínio possui grande variedade de ligas, sendo as mesmas classificadas em dois grupos: ligas fundidas (empregadas nos processos de fundição em areia, fundição sob pressão e de precisão) e ligas conformadas (que tem suas características melhoradas por tratamento térmico ou trabalho a frio) (CHIAVERINI, 1986).

As ligas de alumínio para o processo de fundição sob pressão devem possuir, boa fluidez, baixo ponto de fusão e baixa solubilidade para os gases. Para se obter essas características são necessários acrescentar alguns elementos ligantes no alumínio (ROOY, 1988).

A liga SAE 306 é a mais utilizada na injeção sob pressão devido a sua composição química, pois cada elemento possui uma característica que garante que ao realizar o processo de injeção o processo seja eficiente (ASM HANDBOOK, 1993).

A Tabela 1 inserida abaixo, apresenta a composição química do alumínio 306.

Tabela 1 - Tabela de Composição Química SAE 306

Elemento	Si	Cu	Fe	Mg	Mn	Zn
%	7,5 a 9,5	3,0 a 4,0	1,0 a 1,3	0,1	0,5	3,0

Fonte: Adaptação norma ASTM B85, 2010.

Os metais de ligação são discriminados no Quadro 1 abaixo, nele estão as principais características dos ligantes quando combinados a outros metais.

Quadro 1 - Elementos da composição química do Alumínio 306

Silício	Aumenta resistência e fluidez e reduz a contração do metal
Cobre	Aumenta resistência à tração, mas reduz ductilidade
Ferro	Aumenta resistência, mas reduz fluidez em teores elevados
Magnésio	Refina microestrutura, mas gera inclusões em teores elevados
Manganês	Aumenta fluidez da liga em teores até 3%
Zinco	Aumenta resistência à tração e dureza em teores reduzidos

Fonte: Adaptação norma ASTM B85, 2010.

O quadro 1 traz as principais características presentes na composição química do alumínio 306.

2.1.1 Liga SAE 306

Nas ligas de alumínio é muito comum a inclusões de óxidos e outras impurezas no metal líquido. Estas inclusões ficam retidas na região entre as dendritas e os grãos de alumínio na última fase da solidificação, portanto, os defeitos tendem a se formar nesta fase (FUOCO, 2005).

De acordo com Corradi (2001), durante o processo de solidificação das ligas hipoeutéticas (teor de Si abaixo de 12,6% a 577°C), tem-se a ocorrência de dendritas de fase α , abaixo da linha *liquidus*. Esta fase é constituída de uma solução sólida de alumínio com teor máximo de 1,65% em peso de Si, a 577°C. Posteriormente, no envoltio das dendritas da fase α , ocorre o surgimento dos precipitados.

A Figura 1 apresenta as fases e precipitados presentes na liga SAE 306, com o momento da formação do eutético a 572°C, ilustrando cada fase. Tem-se a formação das fases do silício antes, durante e após a formação da matriz de alumínio α . Precipitados de Al-Cu e Al-Mg formam-se após a liga ter consolidada as fases, sendo que compostos complexos formados por mais de dois elementos são os últimos precipitados a formarem-se.

Figura 1 - Formação da microestrutura SAE 306.

Temperatura (°C)	Fase	Momento da formação
650	$Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ (primário)	Pré-dendrítico
600	Dendritas de alumínio- α , $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ e/ou Al_5FeSi	Dendrítico
		Pós-dendrítico
		Pré-dendrítico
550	Eutético (Al+Si) e Al_5FeSi	Eutético
		Coeutético
540	Mg_2Si ($Mg > 0,2\%$)	Pós-eutético
520-540	Al_2Cu	Pós-eutético
480-500	Fases complexas com vários materiais (Si, Fe, Mg, Cu e Zn)	Pós-eutético



Fonte: adaptação (Kleine, et al, 2013.)

Na Figura 1 traz as principais fases que ocorrem no processo de solidificação do alumínio, a temperatura de ocorrência, composição e seu formato geométrico.

2.2 INJEÇÃO DE ALUMÍNIO SOB PRESSÃO

Os primeiros equipamentos para realização do processo de fundição sob pressão surgiram em meados do século XIX, sendo que em 1849, patenteada por Sturgiss, a primeira máquina para suprir rapidamente tipos fundidos de chumbo para os jornais (Apostila de Fundição sob pressão, UFPR, 2007).

O processo de fundição sob pressão é caracterizado pela injeção de metal líquido em um molde metálico, sob a ação de pressões elevadas, seguindo da solidificação controlada da peça. O molde além de dar a forma a peça, tem a função de absorver as tensões da injeção, dissipa o calor do metal e facilita a remoção da peça sendo preparado para o próximo ciclo (ASM HANDBOOK, 1998).

Devido à alta pressão e conseqüentemente a alta velocidade de enchimento das cavidades, o processo permite a fabricação de peças de formas bastante complexas e de paredes mais finas que o processo de fundição por gravidade, em que o derramamento do alumínio no molde se dá sem a aplicação de pressão e, apenas pela ação da gravidade (CHIAVERINI, 1986).

De acordo com Chiaverini (1986), o processo de injeção sob pressão apresenta como principais vantagens:

- Produção de formas mais complexas;
- Produção de peças com paredes mais finas e tolerâncias dimensionais mais estreitas;
- Alta capacidade de produção;

- Acabamento superficial de ótima qualidade;
- Matrizes de alta durabilidade;
- Algumas ligas, como as de alumínio, apresentam maiores resistências que se fundidas em areia.

As desvantagens do mesmo são:

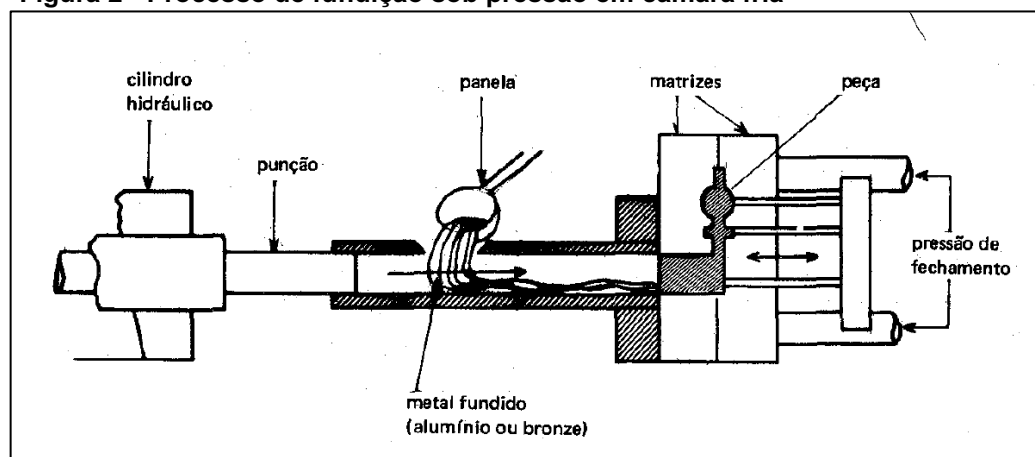
- Dimensões das peças são limitadas;
- Ar retido no interior da matriz pode causar porosidades nas peças fundidas;
- Equipamento e acessórios de alto custo, viáveis para altos volumes.
- Processo só é empregado para ligas cujas temperaturas de fusão não são superiores às das ligas à base de cobre.

As principais ligas utilizadas nesse processo são as de alumínio, zinco, magnésio e a base de cobre, sendo as de alumínio as mais utilizadas. Neste processo, são três as principais variações de máquina para fundição: Câmara quente, câmara fria e injeção direta (ASM HANDBOOK, 1998).

As máquinas de injeção por câmara quente, possuem o sistema de injeção submerso no metal líquido. Já o de câmara fria, o metal líquido é transferido manual ou automaticamente para a bucha de injeção, sendo então introduzido no molde por meio de um pistão, sendo o processo atual na produção de peças em ligas não ferrosas como Magnésio, Alumínio e Zinco, o processo de câmara fria (Apostila de Fundição sob pressão, UFPR, 2007).

Na Figura 2 podem ser vistos uma injetora de câmara fria.

Figura 2 - Processo de fundição sob pressão em câmara fria



Fonte: Chiaverini (1986)

Na Figura 2 é possível ver uma injetora de câmara fria, utilizada em processos de injeção sob pressão.

2.2.1 Defeitos de injeção

De acordo com ASM HANDBOOK (1998), os defeitos que podem vir a ocorrer em uma peça fundida sob pressão, podem estar diretamente ligados com três principais fontes:

- Problemas mecânicos no molde
- Problemas metalúrgicos na liga fundida
- Problemas no fluxo de calor

Essas fontes causadoras de defeitos serão tratadas de maneira detalhada nas próximas seções.

2.2.1.1 Problemas no molde

Os moldes utilizados em fundição sob pressão estão constantemente expostos a tensões cíclicas induzidas por gradientes térmicos e pressão de operação que podem causar fraturas na superfície. Quando o alumínio fundido faz contato com a superfície do ferramental, cria-se um gradiente muito elevado de temperatura. São produzidas tensões de compressão na superfície que causam deformações elásticas e plásticas levando a degradação do molde, com à formação de variadas trincas superficiais, o que afeta diretamente na qualidade da peça fundida (VENDRAMIM, 2008).

De acordo com Vendramim (2008), para evitar que tais problemas ocorram, alguns cuidados precisam ser tomados:

- É necessário realizar o pré-aquecimento do molde antes do início das operações (em torno de 300°);
- Recomendável alívio de tensões depois de concluída a injeção de aproximadamente 5% da quantidade total prevista de peças;
- Utilização de lubrificante / desmoldante conforme recomendação de fabricante (vida útil do ferramental);

- Manter molde aquecido (150° C em estufa) quando há parada de produção prolongada;
- Manutenção com solda.

2.2.1.2 Problemas metalúrgicos na liga fundida

A realização do controle de qualidade do metal fundido é de vital importância para evitar que problemas como defeitos metalúrgicos venham ocorrer na peça final. Os quatro fatores principais são a composição da liga, o conteúdo de gás dissolvido, os sólidos óxidos, compostos intermetálicos e temperaturas inadequadas. Quando não temos o controle dos fatores principais, os resultados podem vir a ser baixa fluidez que causa junta fria, porosidades e trincas (ASM HANDBOOK, 1998).

A solda fria ocorre devido ao encontro de metal líquido de variadas frentes, que acabam não se fundido devido à baixa temperatura. Já as porosidades ocorrem devido ao aprisionamento de gás ou ar durante o enchimento e a solidificação. As porosidades também podem ocorrer devido ao uso de desmoldante incorreto, o qual pode se decompor/solubilizar e passar a fazer parte da composição da liga (ASM HANDBOOK, 1998).

2.2.1.3 Problemas no fluxo de calor

O problema de fluxo de calor, é diretamente ligado ao projeto do ferramental, quando o sistema de ventilação, é inadequado, e *layout* de matriz térmica impede que o calor do processo venha ser dissipado (ASM HANDBOOK, 1998)

2.3 CONFORMAÇÃO MECÂNICA

A conformação mecânica é uma operação onde se aplicam solicitações mecânicas em metais, que respondem com uma mudança permanente em suas dimensões (HELMAN, 1993).

Os processos de conformação podem ser classificados de duas maneiras, sendo elas: processos mecânicos, no qual a sua forma é modificada devido a

aplicação de tensões externas e o processo metalúrgico, no qual ocorre a mudança de forma devido a aplicação de altas temperaturas à peça (ZAVAGLIA, 1997).

Os processos de conformação mecânica são formados pela atuação da deformação plástica, através da aplicação de tensões inferiores ao limite de resistência a ruptura do material. Para obter a geometria final desejado, essas peças podem ser passadas pelo processo de usinagem (ZAVAGLIA, 1997).

O dobramento é um dos processos mais conhecidos da conformação mecânica, sendo realizado a aplicação de flexão em um material plano, até dobrar o mesmo. A dobra pode ocorrer de maneira manual, com o auxílio de algumas ferramentas e gabaritos, ou com a utilização de máquinas, como prensas dobradeiras ou somente dobradeiras. A dobra pode ser feita à quente ou a frio, sendo que na maior parte das vezes, é realizada a frio. A dobra à quente é realizada apenas em casos especiais (GONZÁLEZ, 2000).

O dobramento com a utilização de máquinas, é executado com uma prensa dobradeira. Ela não é tão limitada com relação a espessura a ser dobrada, como no dobramento manual. Nas máquinas que realizam a dobra, são utilizados ferramentais que exercem a punção para a dobra do material (GONZÁLEZ, 2000).

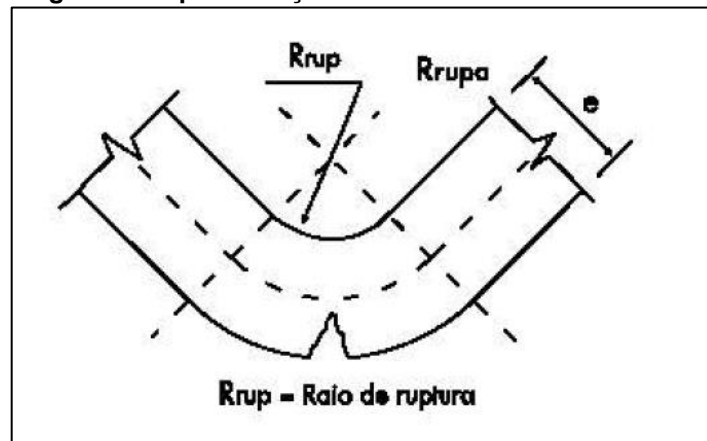
2.3.1 Raio mínimo de dobra

Peças que possuem dobras, precisam seguir a relação, entre espessura e raio, sendo que valores muito pequenos de raios em relação a espessura pode ocasionar altas tensões nas fibras exteriores, podendo causar fraturas na estrutura conformada (RODRIGUES, 2010).

De acordo com PALMEIRA (2005), o raio mínimo é definido como o menor valor aceitável, para não se ter grandes variação de espessura na região dobrada, sendo este valor tomado em função do alongamento que o material sofre ao ser tracionado.

Na Figura 3 é representado o raio de ruptura (raio mínimo), que o material pode ser submetido.

Figura 3- Representação do raio mínimo



Fonte: Palmeira (2005)

Para ter o valor correto do raio mínimo de dobra, a norma DIN 6935, especifica o raio mínimo interno considerando as propriedades mecânicas do material e o sentido de laminação das chapas. Outra maneira é utilizando fatores de correção presentes em ábacos, seguindo a equação mostrada na Figura 4 (FONSECA, 2011).

Figura 4 - Fórmula do Raio mínimo

$$R_{min} = C * h$$

Fonte: Rodrigues (2010)

Abaixo se encontra as variáveis da equação da figura 4, sendo elas:

- R_{min} = Raio mínimo
- C = Fator de correção
- h = Espessura da chapa

Os fatores de correção devem ser tomados de acordo com a Tabela 2, levando em consideração o material, e as condições que o mesmo se encontra, sendo DL a direção da laminação:

Tabela 2- Tabela de fator de correção para obtenção do raio mínimo

Material	Condição do material			
	Recozido		Tratado Termicamente	
	⊥ à DL	∥ à DL	⊥ à DL	∥ à DL
Aço estampagem	0.0	0.2	0.2	0.5
Aço, AISI 1010, 1040	0.1	0.5	0.5	1.0
Aço, AISI 1015,1020	0.2	0.6	0.6	1.2
Cobre	0.1	0.2	1.0	2.0
Latão	0.0	0.2	0.4	0.8
Zinco	0.5	1.0	-	-
Alumínio	0.0	0.2	0.3	0.8
Alumínio duro	1.0	1.5	3.0	4.0
Titânio	0.5	1.0	3.0	5.0

Fonte: Rodrigues (2010)

A tabela 2 apresenta os fatores de correção, para calcular o R_{min} . A mesma se trata de materiais laminados. Não se tem teorias específicas que tratem da conformação de alumínio injetado, sendo, portanto, a utilização dos fatores da tabela 2, como uma aproximação.

2.4 CONCEITOS SOBRE MECÂNICA DA FRATURA

O termo “mecânica da fratura” é utilizado, para definir o comportamento de materiais que contêm descontinuidades superficiais, tais como trincas, poros, inclusões e microtrincas (ASKELAND, 2008). Mecânica da fratura é definida por Callister (2002) como a quantificação das relações entre as propriedades dos materiais, o nível de tensão, a presença de defeitos geradores de trincas e os mecanismos de propagação de trincas. Os materiais com tais intermitências, quando levados a aplicação de tensão, podem apresentar fraturas dúcteis ou frágeis CALLISTER (2002).

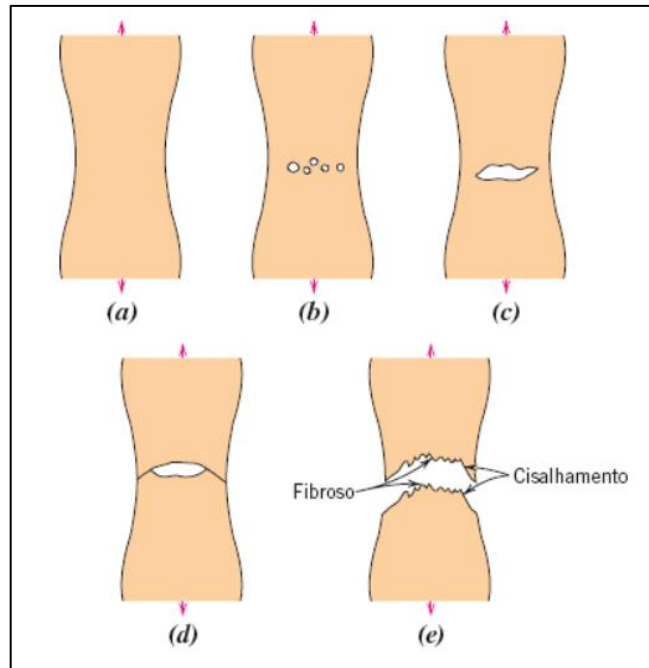
2.4.1 Fratura dúctil

A superfície da fratura dúctil possui características distintas de acordo com o material analisado. Por exemplo, os metais moderadamente dúcteis, ao receberem

tensão contínua, deformam-se plasticamente produzindo uma região de empescoçamento (DIETER, 1981). O perfil de fratura comum em fraturas dúcteis se dá quando ocorre o surgimento do pescoço.

A Figura 5 retrata os estágios para a ocorrência de uma fratura do tipo dúctil (CALLISTER, 2002).

Figura 5 - Estágio de uma fratura dúctil taça e cone



Fonte: (CALLISTER, 2002)

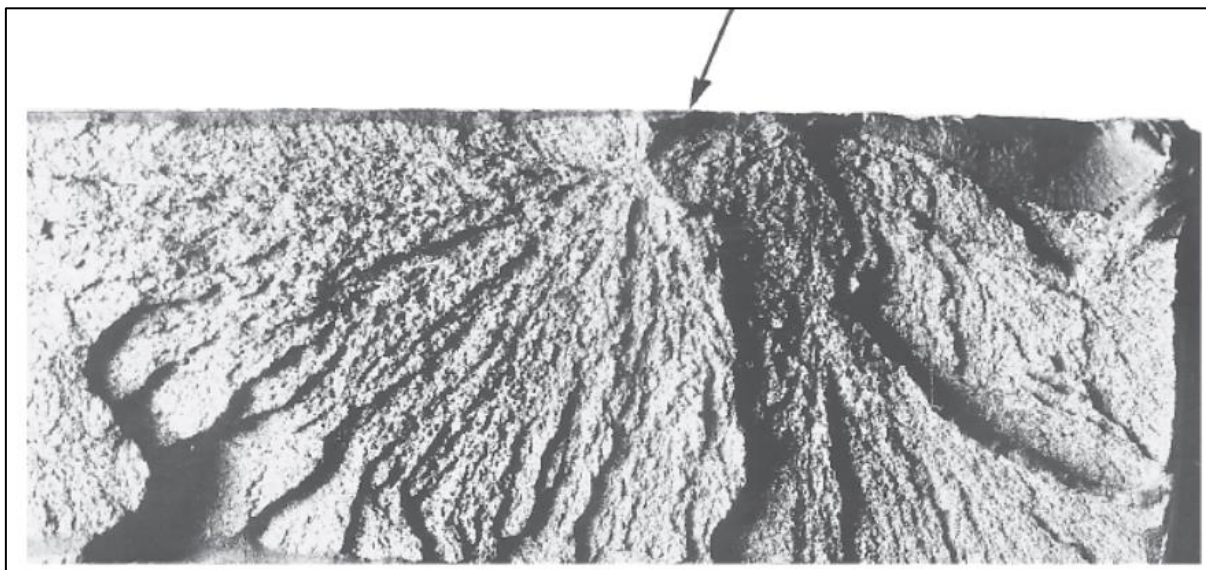
Na figura 5, o ponto 'a' é representado como o início do processo de empescoçamento; no ponto 'b', começam a se formar microvazios no interior da seção, seguidos do aumento dessas cavidades no ponto 'c', que se coalescem, formando uma trinca interna. No ponto 'd' se inicia o processo de propagação dessa trinca no perímetro, ocorrendo em 'e' a fratura por cisalhamento (CALLISTER, 2002).

2.4.2 Fratura frágil

A deformação frágil é caracterizada por meio da rápida propagação de uma trinca (CALLISTER, 2002). Rosa (2012), explica que ocorre uma deformação plástica a nível microscópico no material, sem deformações macroscópicas. Já Dieter (1981) relata que a fratura frágil possui maior tendência em ocorrer quando temos a diminuição veloz da temperatura da peça.

Em componentes que falharam por fratura frágil, como em aços, os sinais aparentes serão “marcas de sargento” em forma de “V”, que podem se formar próximo ao centro da seção transversal da fratura. Outras superfícies podem conter linhas ou nervuras, que se irradiam a partir do ponto de origem da trinca. Na Figura 6 é possível observar a fotografia de uma superfície de fratura frágil.

Figura 6 - Superfície de fratura frágil por meio da clivagem



Fonte: (CALLISTER, 2002)

Na Figura 6, vemos a superfície de fratura frágil, mostrando as nervuras radiais, sendo que a seta, indica a origem da trinca.

2.5 ENSAIOS MECÂNICOS

Ensaio mecânicos são aplicações de esforços (tração, compressão, flexão, torção, cisalhamento e pressão interna) em um material, verificando as resistências deste para cada tipo de esforço (SOUZA, 1982).

Quaisquer produtos, sejam eles acabados ou não, passam por ensaios mecânicos, para determinar fatores como, propriedades mecânicas ou análise de comportamento em condições de aplicação de tensões (GARCIA, 2012).

De acordo com Zolin (2010), os ensaios mecânicos podem ser de dois principais métodos, sendo o ensaio destrutivo, no qual a peça a ser analisada não terá condições de uso após o trabalho, e o ensaio não destrutivo, que possibilita a

utilização da peça após ensaiada. Nas seções seguintes serão abordados os ensaios destrutivos e não destrutivos.

2.5.1 Ensaios Destrutivos

Para realização dos ensaios destrutivos, é necessário saber se o material sofrerá constante compressão, ou uma peça que sofrerá esforços de tração, e quais serão as propriedades a serem avaliadas para aprovação do produto final (SOUZA, 1982).

Em ensaios destrutivos, o procedimento realizado provoca a inviabilização de utilização posterior dos materiais ou nos corpos de prova, mesmo que o dano seja pequeno (ZOLIN, 2010). Esses ensaios são divididos de acordo com o Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação dos ensaios destrutivos

Tração	Flexão (dobramento)
Compressão	Torção
Dureza	Fadiga
Fratura (choque)	Fluência

Fonte: Adaptado de Zolin (2010).

De acordo com o Quadro 2, vemos que os ensaios destrutivos são realizados de diversas maneiras, sendo as mais usuais de tração e compressão.

2.5.1.1 Metalografia

A utilização de microscopia óptica é utilizada por não ser possível observar estruturas a olho nu. A técnica utiliza do aumento na resolução das estruturas da peça, podendo ver partes da estrutura de maneira mais precisa (VOORT, 1985). De acordo com Kesrenbachk (1994) a resolução dos microscópios ópticos convencionais possuem resolução na faixa de 2000 vezes, devendo ter uma superfície perfeitamente polida para ser possível observar de maneira precisa.

Os procedimentos para se realizar a visualização pelo microscópio metalográfico, seguem a norma NBR 13284/1995, conforme discriminado abaixo:

- Os corpos de prova devem representar os lotes a serem examinados. Para análise geral de rotina, os corpos de prova são selecionados de locais que facilitem a visualização das máximas variações do material. Para análise de falhas, os corpos de provas devem ser retirados o mais próximo possível da fratura, ou do início da mesma. Já para análise de pesquisa, o pesquisador pode retirar o corpo de prova do local que o mesmo julgar melhor;
- O tipo de seção a ser examinada interfere diretamente com as informações a serem reveladas. Seção transversal revelam as variações na estrutura, distribuição de impurezas, profundidade das imperfeições, profundidade de corrosão, espessura e estrutura do revestimento de proteção e o tamanho do grão. Já em seção longitudinal, posso ver as impurezas não metálicas, grau de deformação plástica vista pela distorção do grão e visualizar o resultado de um tratamento térmico;
- O dimensionamento do corpo de prova deve compreender as faixas de 12 a 15 mm de lado ou 12 a 25 mm de diâmetro para materiais redondos. A altura deve ser suficiente para se poder manusear na etapa de lixamento e polimento, preferencialmente entre 15 a 20 mm;
- As amostras são normalmente extraídas cortando-se com serra ou disco de corte abrasivo, visto que a estrutura metalográfica não pode ser afetada;
- Os embutimento dos corpos de prova têm o objetivo de facilitar os processos subsequentes e proteger o material. O mesmo pode ser realizado a quente ou a frio. Indica-se a frio quando o material a ser examinado não poderá ter interferência térmica em sua microestrutura;
- O processo de lixamento da superfície da amostra, tem como finalidade a retirada de todos riscos grosseiros e a obtenção da superfície plana. Devendo no momento do lixamento a superfície ser lubrificada com água, promovendo a lubrificação e o arraste das partículas extraídas. No lixamento é utilizado lixas que partem da granulometria mais grossa para a mais fina, sendo comumente utilizada 180, 220, 320, 400 e 600, devendo a cada troca de lixa, rotacionar a peça a 90° de maneira a eliminar riscos produzidos pela lixa anterior. Sempre ao iniciar o processo, precisa-se

limpar a superfície de quaisquer impurezas, e ao se trocar de lixa, também se faz necessário eliminar quaisquer resquícios da lixa anterior;

- No polimento os abrasivos são soltos e aplicados em superfície previamente lubrificada. O objetivo é ter uma superfície isenta de riscos. A escolha do abrasivo é feita em função do material a ser estudado, podendo-se ter abrasivos de:
 - Diamante;
 - Óxido de alumínio;
 - Carbetto de Silício;
 - Óxido de cromo;
 - Óxido de magnésio;
 - Óxido de cério;
 - Dióxido de silício.
- O polimento pode ser feito de maneira:
 - Manual;
 - Automático;
 - Vibratório;
 - Químico;
 - Eletrolítico.
- O ataque químico deve ser realizado após o polimento, de maneira que os reagentes químicos façam o processo de óxido-redução, revelando parte da estrutura do material, seguido posteriormente da verificação via microscópio. A NBR 8108 deverá ser utilizada para a escolha do reagente químico.

2.5.1.2 Dureza

De acordo com Souza (1982) existem três formas de verificar a dureza de uma peça, sendo elas; por penetração, choque ou risco, sendo este último raramente utilizado para verificação em metais.

Os ensaios de dureza pelo processo de penetração, consistem em aplicar cargas pré-determinadas na superfície da peça, na qual o aplicador de carga realiza uma marca na superfície da peça, sendo essa impressão utilizada para verificar a

dureza. Os principais ensaios por penetração são: Vickers e Rockwell (GARCIA, 2012).

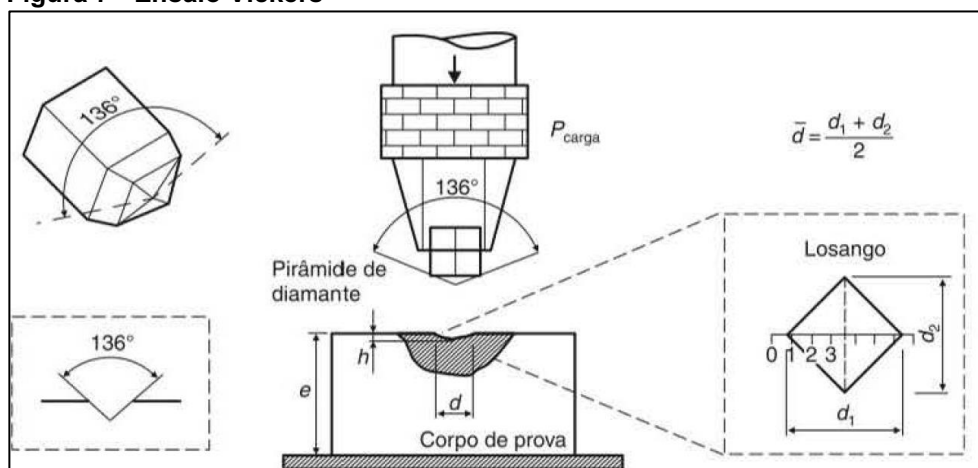
2.5.1.2.1 Vickers

No ensaio Vickers, os principais fatores que definem a dureza final da peça são área de impressão e a carga aplicada. O penetrador é em formato de pirâmide, fabricado em diamante de base quadrada, tendo ângulos entre faces opostas medindo 136° . Após aplicar a carga, a área de impressão do indentador é verificada, e se mede as diagonais via microscópio (GARCIA, 2012).

Conforme Souza (1982), a carga utilizada é indiferente para a dureza, devendo, portanto, ser aplicada a mesma carga, e informando a mesma dureza para diferentes áreas da peça, devendo ser aplicado no tempo de 10 a 15 segundos para materiais duros (metálicos) e de 30 a 60 segundos para materiais moles (polímeros).

Na Figura 7 temos a representação simplificado do ensaio Vickers.

Figura 7 - Ensaio Vickers



Fonte: Garcia (2012).

De acordo com a Figura 7 é possível ver como é realizado o ensaio de dureza Vickers, desde a aplicação do indutor a medição da marca na peça.

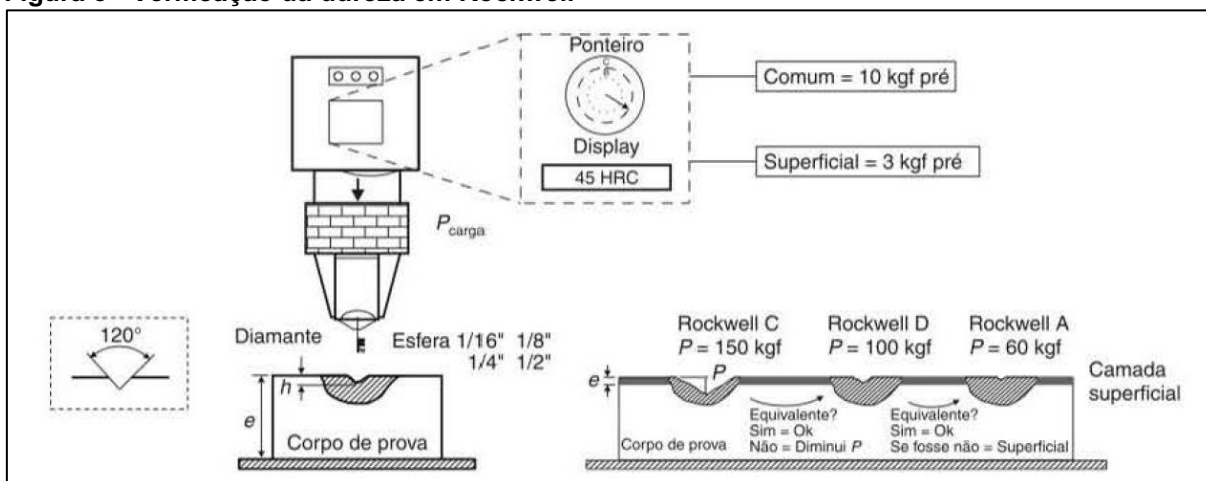
2.5.1.2.2 Rockwell

O ensaio de dureza Rockwell é um dos mais rápidos e precisos, pois não necessita de intervenção humana. Esse ensaio é realizado aplicando-se o indentador na peça, e a marcação é lida de maneira automática. Este ensaio é baseado na profundidade de penetração, subtraindo-se a recuperação elástica do material, sendo, portanto, os dados de dureza, mostrados na tela do equipamento (SOUZA, 1982).

De acordo com Garcia (2012) deve-se ter os devidos cuidados para selecionar a escala correta de acordo com o tipo do indentador para a efetividade do ensaio.

A figura 8 retrata como é realizado o ensaio de dureza Rockwell.

Figura 8 - Verificação da dureza em Rockwell



Fonte: Garcia (2012).

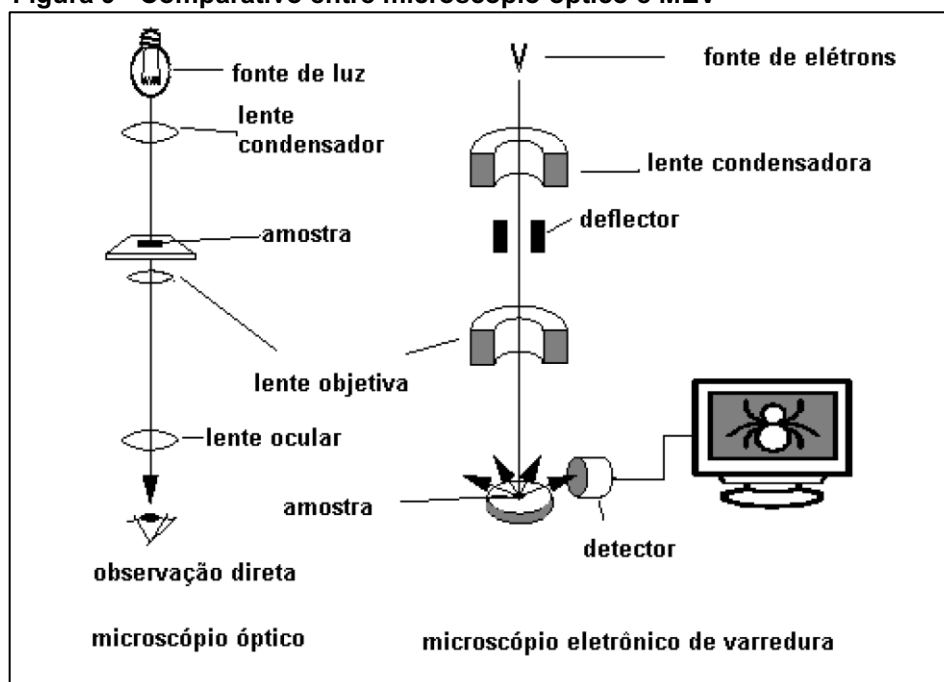
De acordo com a Figura 8 é possível verificar o ensaio do tipo rockwell, e a técnica de medição feita através de escalas.

2.5.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) nos fornece informações sobre a morfologia e a identificação de elementos químicos em uma amostra. O mesmo tem a capacidade de resolução na faixa de 10 a 150.000 vezes, sendo, portanto, largamente utilizado na biologia, odontologia, farmácia, engenharia, química, metalurgia, física, medicina e geologia (MANNHEIMER, 2002).

De acordo com Devadid et. al. (2007) o funcionamento se baseia na obtenção de vácuo na câmara MEV, e posterior disparo de um feixe de elétrons na superfície da amostra em todo o entorno. Os elétrons ao entrar em contato com a peça, fornecem informações topográficas e morfológicas da amostra. A Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS) é a responsável por verificar a assinatura de absorção/emissão de cada elemento, e nos informar quais elementos conseqüentemente constituem o objeto de estudo.

Figura 9 - Comparativo entre microscópio óptico e MEV



Fonte: Devadid Et. Al. (2007)

Na Figura 9 é possível verificar como é realizada a verificação de peças utilizando a microscopia óptica e a microscopia eletrônica de varredura.

2.5.2 Ensaios não destrutivos

Para o Instituto Britânico de Ensaios Não Destrutivos (BINDT), utilizam-se desse ensaio quando se necessita detectar falhas nos materiais, como inclusões, trincas ou até mesmo cordão de solda com avarias, que pode levar a perda da resistência e posteriormente a falha da peça (BINDT, 2019).

Esse método de ensaio é geralmente realizado sobre peças semiacabadas ou acabadas, visto que o mesmo não deixa marcas sobre a mesma, conseqüentemente

não prejudicam nem interferem com o futuro das mesmas (GARCIA, 2012). Também são utilizados para controle da qualidade de materiais e produtos, contribuindo para reduzir os custos e aumentar a confiabilidade dos processos associados (SGS, 2018).

Os ensaios não destrutivos podem ser dividido em várias categorias, os principais são listados no quadro abaixo (Quadro 3).

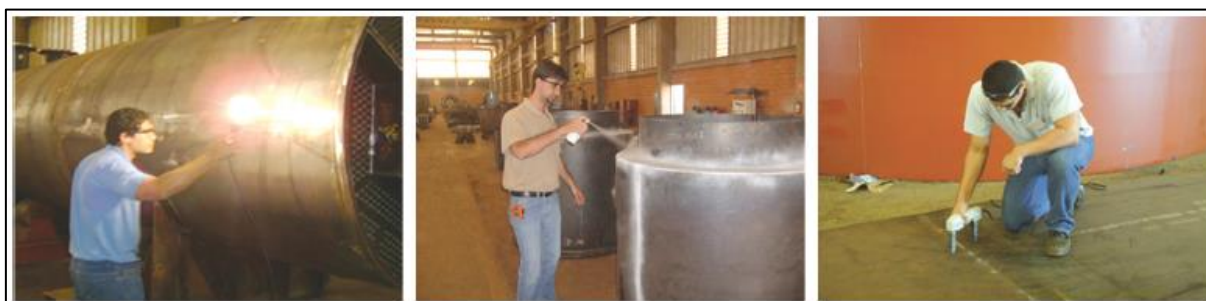
Quadro 3 - Classificação dos ensaios não destrutivos

Visual	Líquidos penetrantes
Radiografia com raio x	Radiografia com raio y
Ultrassom	Magnéticos
Eléctromagnéticos	Térmicos

Fonte: Autoria própria.

Os ensaios mais aplicados atualmente são mostrados na fotografia abaixo (Figura 10), sendo da esquerda para a direita Ensaio visual, líquidos penetrantes e partículas magnéticas, respectivamente.

Figura 10 - Ensaios não destrutivos



Fonte: Zolin (2010).

Na Figura 10 é possível ver os métodos empregados de ensaios não destrutivos.

2.5.2.1 Ensaio visual

É uma técnica simples para detectar não somente falhas na superfície ou distorções na estrutura, mas também o grau de acabamento e de formato de uma peça. Esse tipo de ensaio depende de aspectos como a luminosidade do ambiente, e a experiência da pessoa que fará a verificação, e podem ser usados lupas,

microscópios, projetores óticos, gabaritos e comparadores para realização desse ensaio (SGS, 2018).

2.6 ELEMENTOS FINITOS

O método de elementos finitos é basicamente uma forma numérica que se aproxima de alguns fenômenos que ocorrem em meios contínuos, isto é, aqueles que podem ser descritos através de equações diferenciais parciais, com condições de contorno para tal problema (XAVIER, 2008).

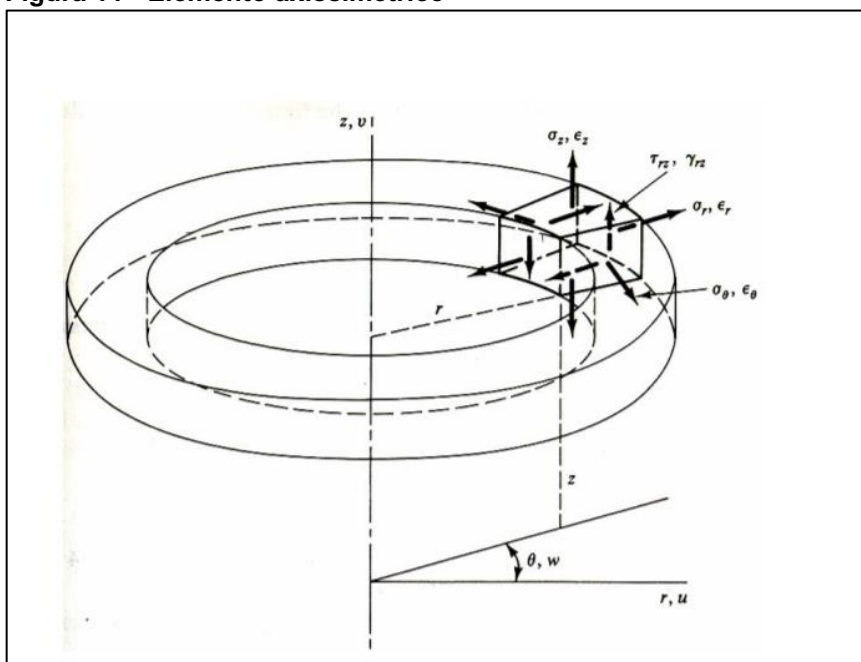
De acordo com Weaver e Johnston (1984) um elemento finito nada mais é que uma subdivisão contínua discreta de um elemento em outros elementos com dimensões finitas, sendo essa discretização utilizadas em elementos sólidos, superfície e de retas. Essa modelagem é necessária para se calcular as tensões e deformações na estrutura como um todo, viabilizar as análises complexas, dificilmente viáveis manualmente.

No desenvolvimento de uma simulação de Elementos Finitos, algumas técnicas são utilizadas visando a simplificação do modelo, para se ter uma otimização da análise. As principais técnicas são a utilização de simetria e axissimetria, visando a redução da quantidade de elementos necessária para realizar o estudo, reduzindo o esforço computacional, e o melhoramento do refino de malha (ANSYS, 2019).

2.6.1 Sólido Axissimétricos

Um sólido axissimétrico é compreendido como um sólido que ao ser rotacionado sobre o eixo central, o resultado final será um corpo tridimensional (WEAVER E JOHNSTON, 1984). Na figura 11 é possível entender um elemento axissimétrico.

Figura 11 - Elemento axissimétrico



Fonte: Weaver e Johnston (1984).

Esses sólidos quando utilizados no *software* Ansys®, a utilização do mesmo se dá pela rotação em torno do eixo, devendo ser necessariamente no eixo Y. E na simulação é utilizado apenas o sólido não rotacionado, para definir as tensões em todo o entorno (pós rotação), sendo conseqüentemente, uma simulação mais rápida, independente do refino de malha (ANSYS®, 2019).

2.6.1.1 Elementos de Malha

De acordo com Antoniacomi e Souza (2010), a escolha do tipo de malha impacta diretamente no resultado final da simulação, sendo que um elemento erroneamente utilizado pode conduzir a simulação a resultados incorretos. Owen (1998), apresenta alguns modelamentos de malha, podendo ser triangular, hexaedro, quadrilátero entre outros modelos, podendo-se ainda, serem refinadas para se ter resultados mais próximos ao fenômeno real.

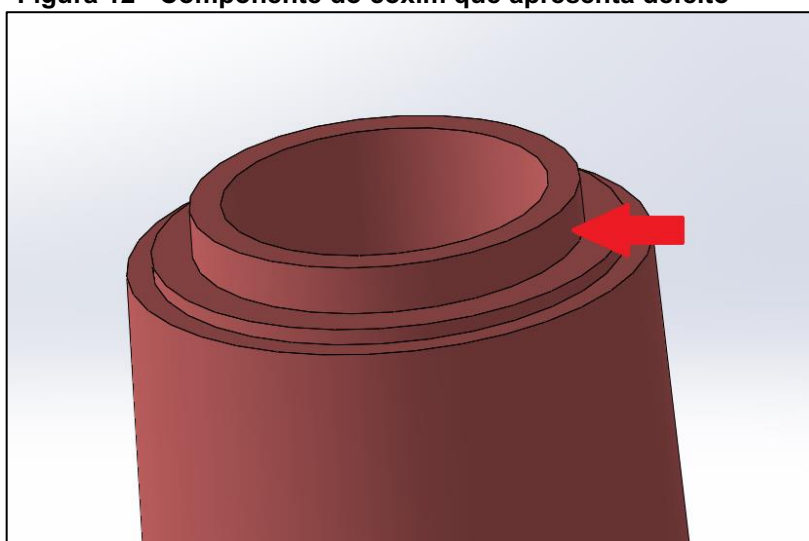
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta a metodologia de trabalho que foi seguida para a finalização deste trabalho. A seção 3.1 dedicada a metodologia para obtenção dos corpos de prova, 3.2 a análise microestrutural e a última seção 3.3 para a análise numérica.

3.1 CORPOS DE PROVA

A peça a ser estudada, e que apresenta falha, é um pino que faz parte de um coxim veicular. Na Figura 12 é possível verificar o desenho esquemático da peça que apresenta falha, sendo a seta vermelha indicando a região que dobra, e falha.

Figura 12 - Componente do coxim que apresenta defeito



Fonte: Autoria Própria.

Foram fornecidas cinco amostras pela indústria parceira para realização deste trabalho, todas fabricadas em alumínio SAE 306 (sendo quatro delas, referente a cada cavidade do molde) e de mesmo lote, e outra amostra que apresentou falha durante o processo de montagem, de outro lote. As amostras foram denominadas 0 (amostra fraturada), e 1, 2, 3 e 4 para as outras não fraturadas, sendo referenciadas de acordo com a cavidade do molde.

A amostra com defeito estava completamente montada, portanto, para realizar a retirada da mesma, foi necessário a utilização de uma serra de mão para corte, evitando causar quaisquer danos a peça que foi nosso objeto de estudo.

Após retirada a amostra com falha, todas as peças passaram pelo processo de corte utilizando a serra policorte específica para metalografia, utilizando disco abrasivo, sendo priorizado o corte das amostras nos locais onde a mesma possuía a falha.

Na Figura 13 pode-se observar todas as amostras, que estavam sendo devidamente cortadas.

Figura 13 - Amostras cortadas



Fonte: Autoria Própria.

Após cortar as peças, a amostra que foi retirada do coxim, apresentava o raio de dobra na qual as peças são submetidas, sendo assim, foi realizado uma captura no microscópio, e verificando com o *software* IMAGE J², o valor desse raio, e comparado com a literatura, para verificar se a dobra não atingiu o raio crítico.

A Figura 14 é a captura realizada via microscópio da peça conformada. A mesma foi utilizada no *software* da seguinte maneira, foi posicionado uma linha reta na horizontal, e tendo a mesma como base foi verificado o valor do raio referente a dobra., no qual foi utilizado no *software*, para verificação do raio mínimo.

² <https://imagej.nih.gov/ij/>

Figura 14 – Amostra dobrada

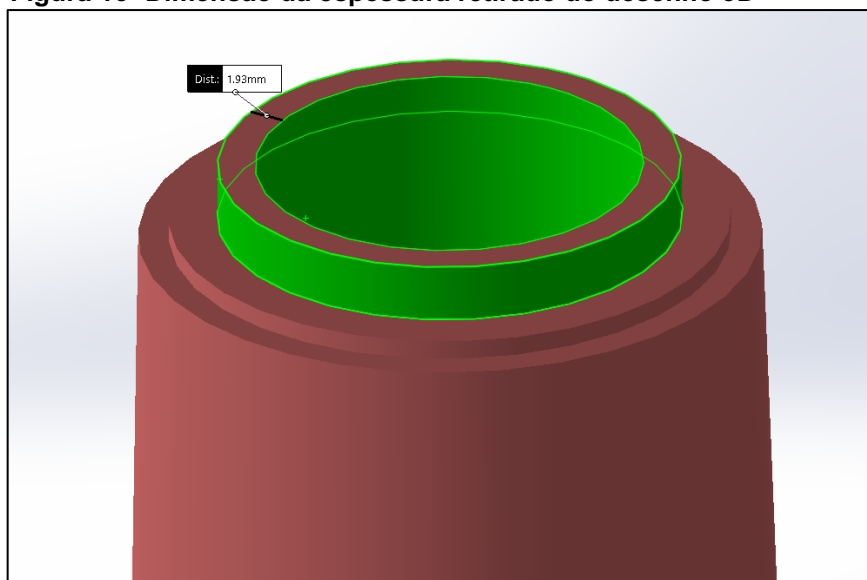


Fonte: Autoria Própria.

Para utilização da fórmula foi necessário obter a espessura do componente que dobra no pino, sendo assim, foi verificado junto ao 3D essa medida.

A Figura 15 é mostrada à medida que foi retirada da peça no 3D.

Figura 15- Dimensão da espessura retirado do desenho 3D



Fonte: Autoria própria

Na figura 15, é possível verificar a medição da espessura da região de dobra.

3.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Os parâmetros analisados foram defeitos subsuperficiais, tipo de fratura e a dureza. Portanto, fizeram-se necessários três tipos diferentes de ensaios: ensaio de inspeção visual, MEV, metalografia e dureza.

Ao final do trabalho, os resultados obtidos para os cinco corpos de prova foram analisados em gráficos comparativos, em que foi possível observar as principais diferenças encontradas nos mesmos.

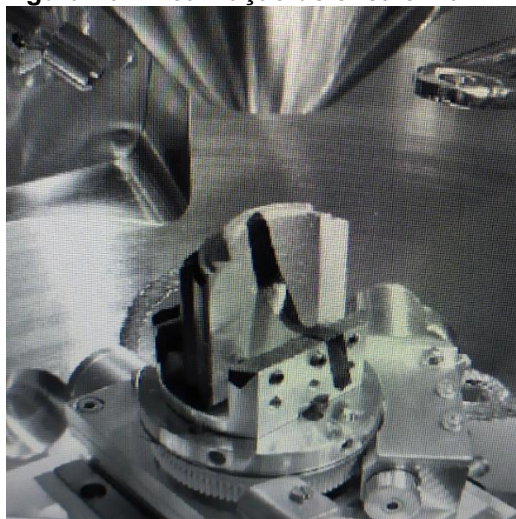
3.2.1 Ensaio MEV

Após a retirada da amostra falhada do conjunto montado e iniciado a preparação para a realização do ensaio MEV, foram realizados os seguintes procedimentos:

- As amostras foram limpas em água corrente, para retirada de quaisquer impurezas decorrentes do corte;
- Foi realizada a secagem por meio de jatos de ar;
- Foi inserida a fita condutora e levada a câmara do microscópio, que retirou todo o ar presente na câmara, e fez-se o ensaio.

Na Figura 16 é retratado a peça dentro da câmara do MEV, para realização do ensaio.

Figura 16 – Realização de ensaio via MEV



Fonte: Autoria Própria.

Após realizado o ensaio MEV, conforme figura 16, se inicia a realização do ensaio metalográfico.

3.2.2 Ensaio Metalográfico

Após realizado esse ensaio, as peças foram preparadas para realização do ensaio de metalografia, sendo os cinco corpos de prova, todos cortadas de maneira vertical e horizontal. Posteriormente foi realizado o embutimento das mesmas em resina a frio, então as amostras passaram pelos seguintes processos:

- Lixamento com lixas de granulometrias de 100, 220, 320, 600 e 1200 mesh;
- Polimento com pasta diamantada de 1 e 0,25 μm .
- Realização do ensaio metalográfico.

3.2.3 Ensaio usando microcargas

Após a realização do ensaio metalográfico, foram preparadas as amostras para realização do ensaio de dureza. Esse ensaio foi utilizado para analisar indiretamente o encruamento da peça dobrada, e a dureza das amostras de diferentes lotes. As preparações das amostras foram semelhantes a preparação para a metalografia, sendo assim foram realizadas as seguintes etapas:

- As amostras foram lixadas com lixas de granulometrias de 100, 220, 320, 600 e 1200 mesh;
- Após o lixamento as amostras foram polidas com pasta diamantada de 1 e 0,25 μm .

O ensaio de dureza foi realizado em um Microdurômetro Vickers da marca Shimadzu, sendo utilizado uma carga de 2,942N, no tempo de penetração de 15 segundos. Em cada amostra foram realizadas cinco medidas em pontos diferentes, e com isso foi verificado a dispersão por meio de um gráfico.

3.3 ANÁLISE NUMÉRICA

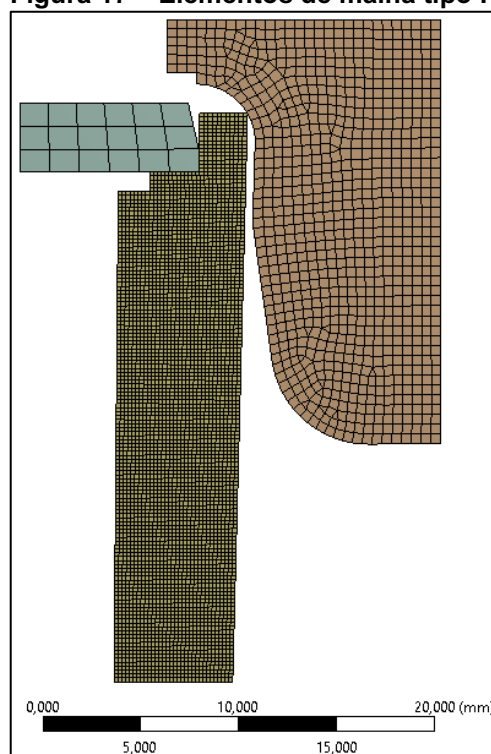
Para realização da análise numérica, foi necessário realizar o desenho de dois componentes do coxim, sendo eles, o pino central do coxim, que é objeto de estudo e

uma chapa que é montada junto a peça estudada. O segundo desenho necessário foi do pino de dobra que realiza a conformação do pino central.

Para facilidade de modelagem, foi realizado o desenho como superfície, para se utilizar a simulação axissimétrica. A malha utilizada é do tipo plane 183, a mesma é composta por 8 nós e é geralmente utilizada para modelagem axissimétrica. Neste tipo de modelagem o elemento possui três graus de liberdade em cada nó, sendo a translação nas direções x e y, e a rotação em y.

Na Figura 17 é retratado as superfícies desenhadas, e também é possível verificar o refinamento de malha utilizado no pino, que é nosso objeto de estudo.

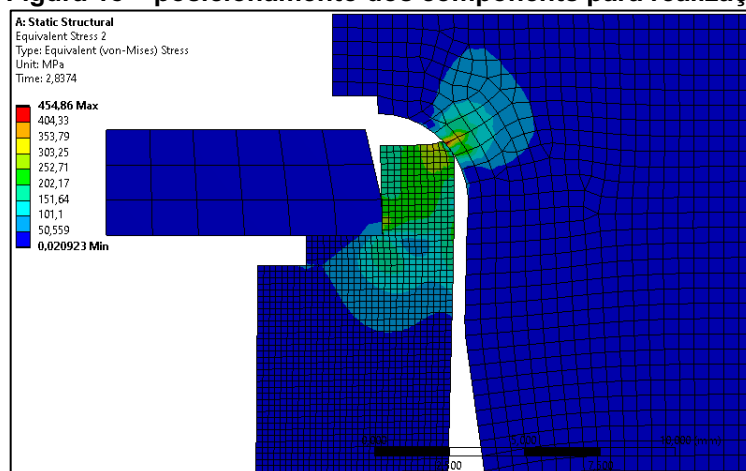
Figura 17 – Elementos de malha tipo Plane 183



Fonte: Autoria Própria.

Para realização da dobra é utilizado uma pré-carga, que posiciona o pino de dobra a 16,95 mm (até encostar no pino central, conforme Figura 18), e posteriormente aplica-se uma força de 70kN, sendo esta força, aplicada pelo tempo de 1 segundo, percorrendo o pino de dobra, uma distância de 1,4mm desde o seu posicionamento na pré-carga, até realizar a dobra.

Figura 18 – posicionamento dos components para realização da simulação



Fonte: Autoria Própria.

Na aplicação da força de dobra, a peça inicia a deformação, conforme pode ser visto na Figura 18, na região verde e azul claro.

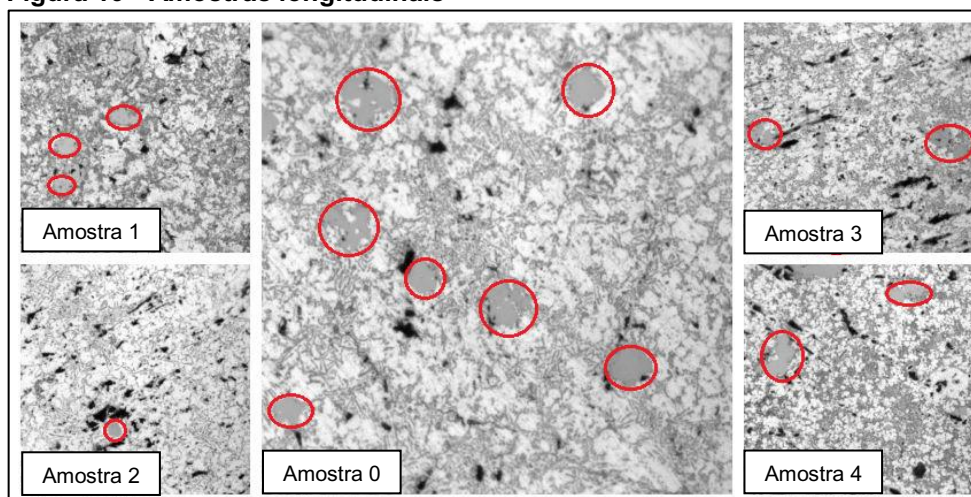
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando-se da metodologia apresentada na seção 3, obtivemos os resultados que são apresentados nesta seção.

4.1 METALOGRAFIA

As amostras 0, 1, 2, 3 e 4 foram analisadas via ensaio metalográfico nas áreas longitudinais e transversais. As mesmas passaram pelo processo de lixamento e polimento, sem necessidade de realizar o ataque químico, visto que, com o polimento perfeito foi possível verificar a microestrutura das amostras perfeitamente.

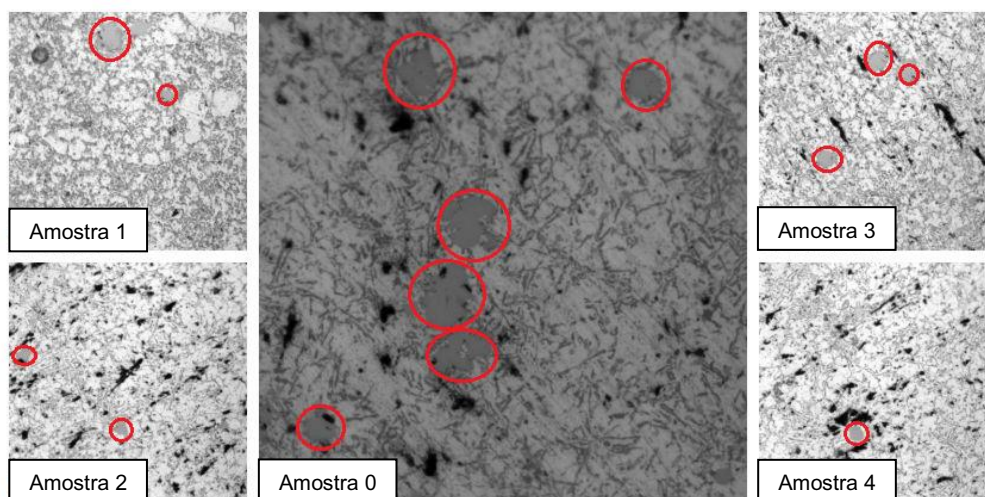
Na Figura 19 é visto as cinco amostras no sentido longitudinal.

Figura 19 - Amostras longitudinais

Fonte: Autoria Própria

Pode-se concluir que todas as amostras vistas no sentido longitudinal apresentaram inúmeras porosidades em suas superfícies (pontos e linhas pretas), independente da cavidade. Os pontos destacados pelo círculo vermelho nos mostram os possíveis precipitados, sendo mais presentes na amostra 0.

Na Figura 20, é visto as cinco amostras no sentido transversal.

Figura 20 - Amostras transversais

Fonte: Autoria Própria.

As amostras vistas no sentido transversal também apresentaram inúmeras porosidades, similar ao sentido longitudinal.

Tendo a amostra 0 já passado pelo processo de dobramento, pode-se concluir que alguns defeitos foram diminuídos pela reorganização da microestrutura, gerando maiores tensões na peça em tais locais, sendo suscetíveis a ocorrência de trincas.

Outros pontos a serem observados, são possíveis precipitados identificados pelos círculos vermelhos nas Figuras 19 e 20, sendo que esses precipitados são mais frequentes recorrentes na amostra 0, conforme visto na metalografia vista longitudinalmente.

4.2 ANÁLISE DAS AMOSTRAS NO MEV

Anterior ao corte das amostras para ensaio de metalografia, foi realizado a análise da amostra 0 junto ao MEV, no qual procurou-se identificar um possível início de trinca, e se a fratura foi do tipo frágil ou dúctil.

O resultado obtido se encontra na Figura 21 abaixo, sendo a peça fraturada vista a olho nu na esquerda, a peça vista pelo MEV.

Figura 21 – Peça fraturada



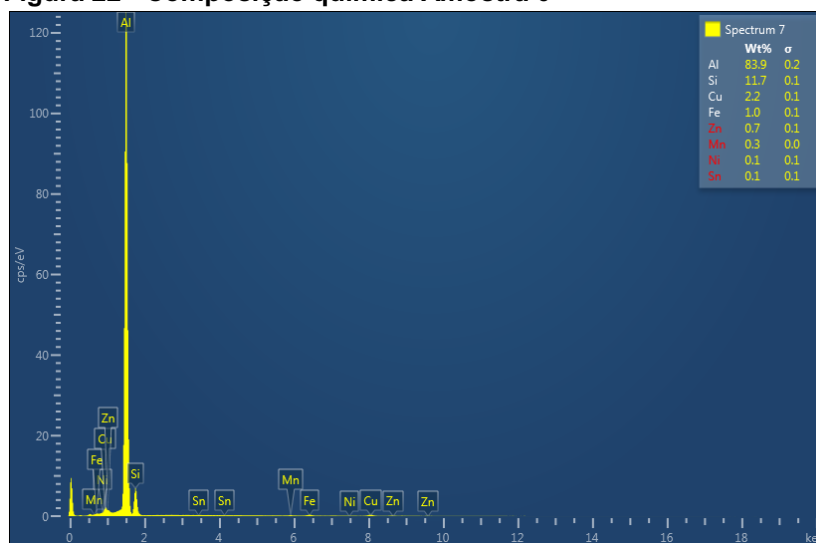
Fonte: Autoria Própria.

Constata-se que na dobra da peça, tivemos a presença de inúmeros inícios de trincas no seu entorno, o que confirma as informações obtidas do ensaio metalográfico, os poros causam maiores tensões na peça, fazendo com que o mesmo venha ser suscetível ao surgimento de trincas, e venha fraturar de maneira frágil.

Foram selecionadas as amostras 0 e 2 para realização do ensaio de EDS, com o objetivo de confirmar se as ligas de lotes diferentes, possuía a mesma composição química.

Na Figura 22 é possível verificar o EDS realizado da amostra 0.

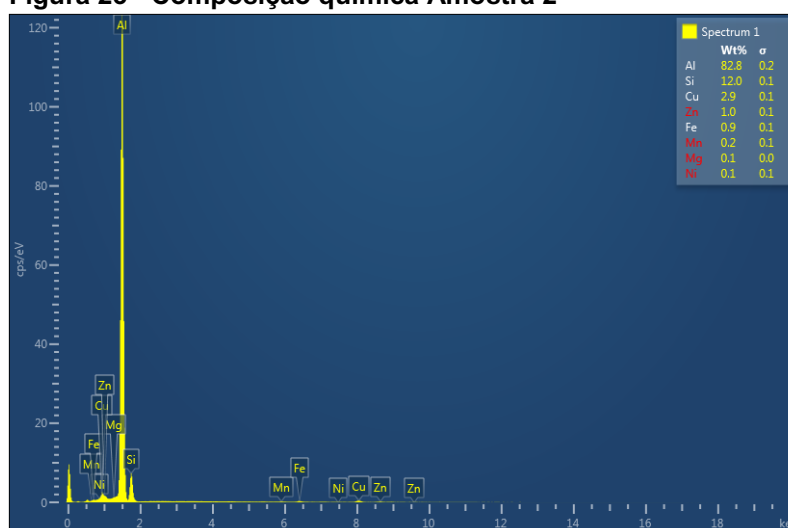
Figura 22 - Composição química Amostra 0



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 23 é possível verificar o EDS realizado na amostra 2.

Figura 23 - Composição química Amostra 2

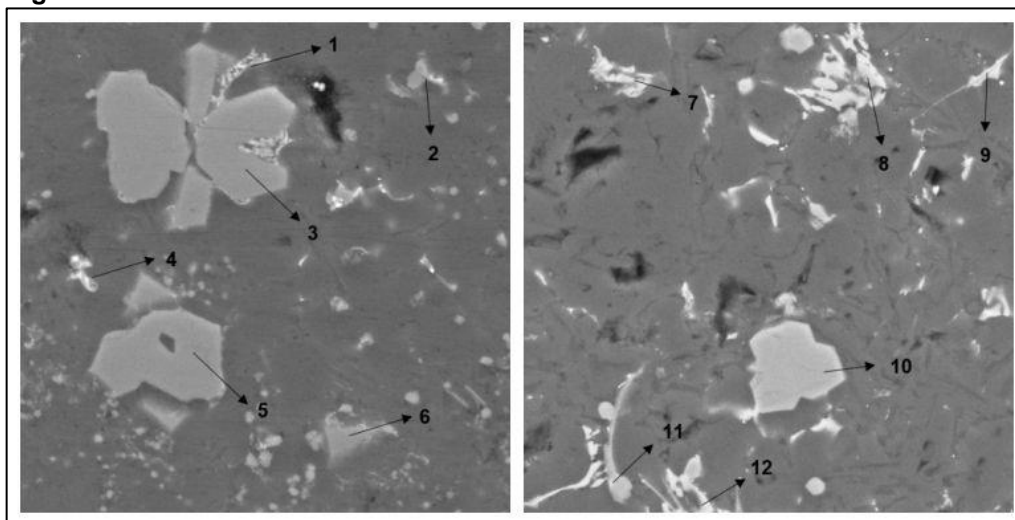


Fonte: Autoria própria.

A Figura 22 é a composição química referente ao lote da amostra 0. A mesma possui silício a 11,9%, sendo que o especificado pela norma ASTM B85, é máximo em 9,5%. Já o lote da amostra 2, possui silício a 12%. O restante da composição química das mesmas está dentro do especificado.

Utilizando as mesmas amostras (0 e 2) como referência, foram analisadas as fases e precipitados presentes na liga, conforme ilustrado na Figura 24, sendo a amostra 0 a esquerda e a amostra 2 a direita.

Figura 24 - Amostra 0 e 2

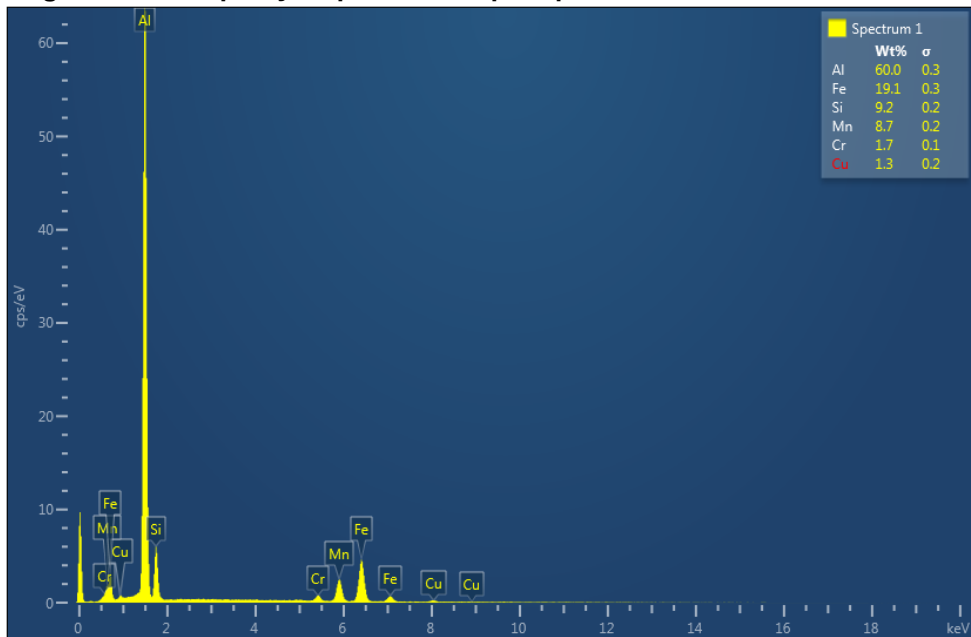


Fonte: Autoria própria.

É possível identificar na Figura 24 que nos pontos (9), (11) e (12) são caracterizados pelo Eutético Al+Si, já os pontos (2), (4), (6), (7) e (8) são precipitados de Al₂+Cu pós-eutético. Para os pontos (1), (3), (5) e (10) não foram encontrados nada que os identificassem na referência bibliográfica citado neste trabalho, portanto, para a identificação foi realizado ensaio de EDS nesses pontos, para se confirmar a composição desses precipitados.

Na Figura 25 temos a composição química dos precipitados desconhecidos referente a amostra 0, no qual foi tomado com base o ponto (3), visto que a composição química dos pontos (1) e (5) possuía percentuais muito similares para os elementos ligantes.

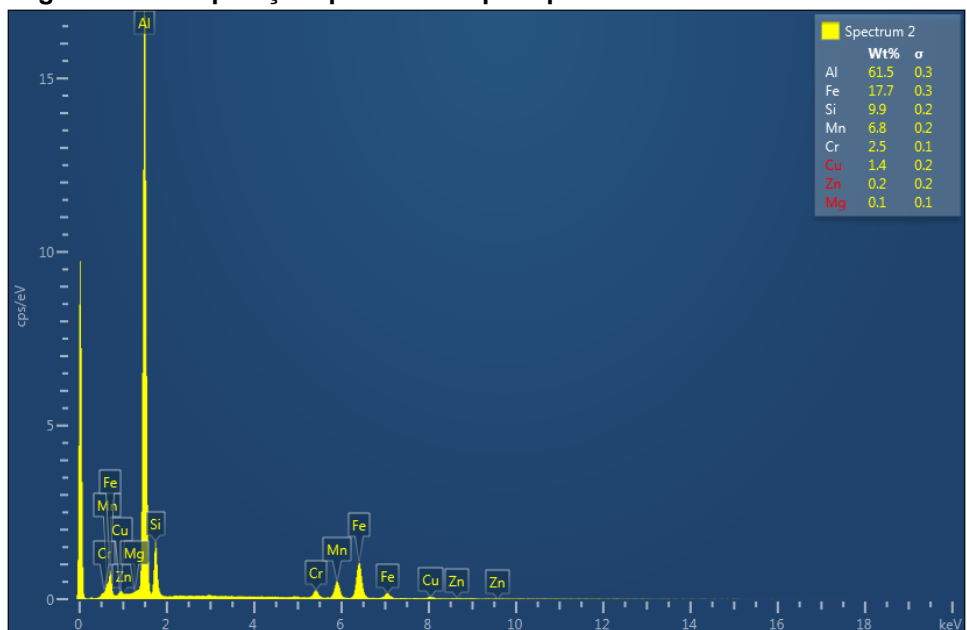
Figura 25 - Composição química dos precipitados desconhecidos amostra 0



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 26 temos o EDS da composição química dos precipitados desconhecidos referente a amostra 2, feita com base no ponto (10) identificado na Figura 24.

Figura 26 - composição química dos precipitados desconhecidos amostra 2



Fonte: Autoria própria.

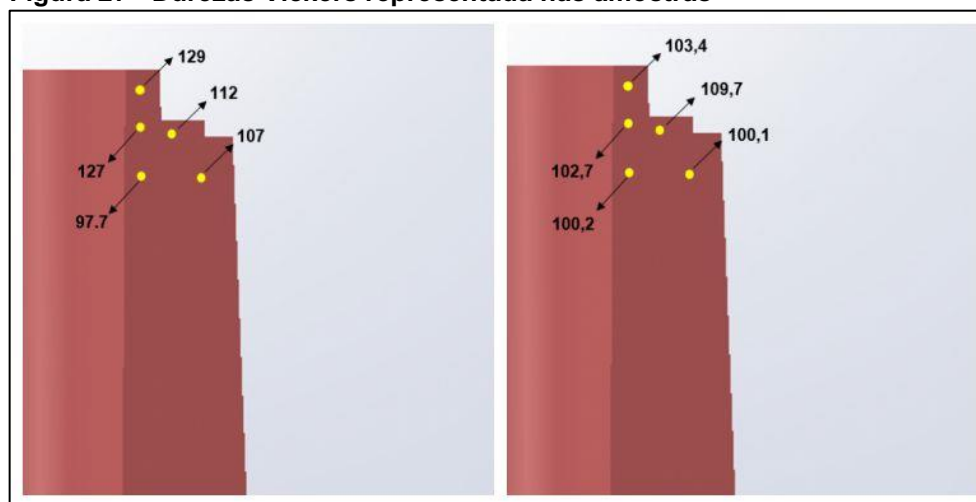
Em ambas amostras o elemento ferro é o que possui 2º maior composição, sendo de 19,1% para a amostra 0 e de 17,7% para a amostra 2. Tendo o cromo surgido na liga, e o % de manganês aumentado relativamente, (8,7% para amostra 0 e 6,8% na amostra 2), conclui-se que se trata de cristais intermetálicos de fase α primaria, sendo $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn},\text{Cr})_4\text{Si}_2$.

4.3 DUREZA VICKERS

Para verificação da dureza, foram realizados em cinco pontos diferentes nas cinco amostras. Nas amostras 1, 2, 3 e 4, não se teve grandes variações de dureza.

Na Figura 27 é retratado os pontos onde foram realizadas as medições das durezas. Na esquerda temos a medição de dureza realizada na amostra 0, com os respectivos valores para cada ponto, seguida a direita, da média, das durezas realizadas nas amostras 1 a 4, sendo seus valores muito próximos, os mesmos são demonstrados abaixo juntamente com os valores da amostra 0, e para as outras foi tomado uma média, e a mesma está representada na Figura 27.

Figura 27 - Durezas Vickers representada nas amostras

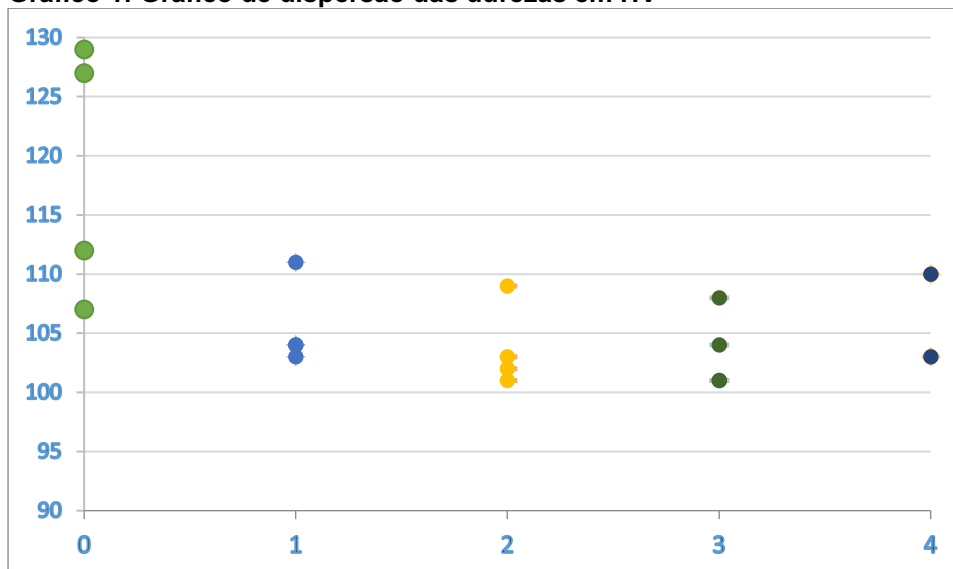


Fonte: Autoria própria.

No gráfico de dispersão abaixo (Gráfico 1) temos, no eixo das coordenadas a durezas em HV encontradas (90 a 130 HV), e os pontos em verde são os valores obtidos na amostra 0, e o restante são das amostras 1, 2, 3 e 4 e no eixo das abcissas a identificação das amostras (0 a 4). É possível perceber que os pontos mais

dispersos são referentes a amostra 0, visto que o mesmo no momento que passa pelo processo de dobra a frio, a amostra encrua e consequentemente a dureza se eleva.

Gráfico 1: Gráfico de dispersão das durezas em HV



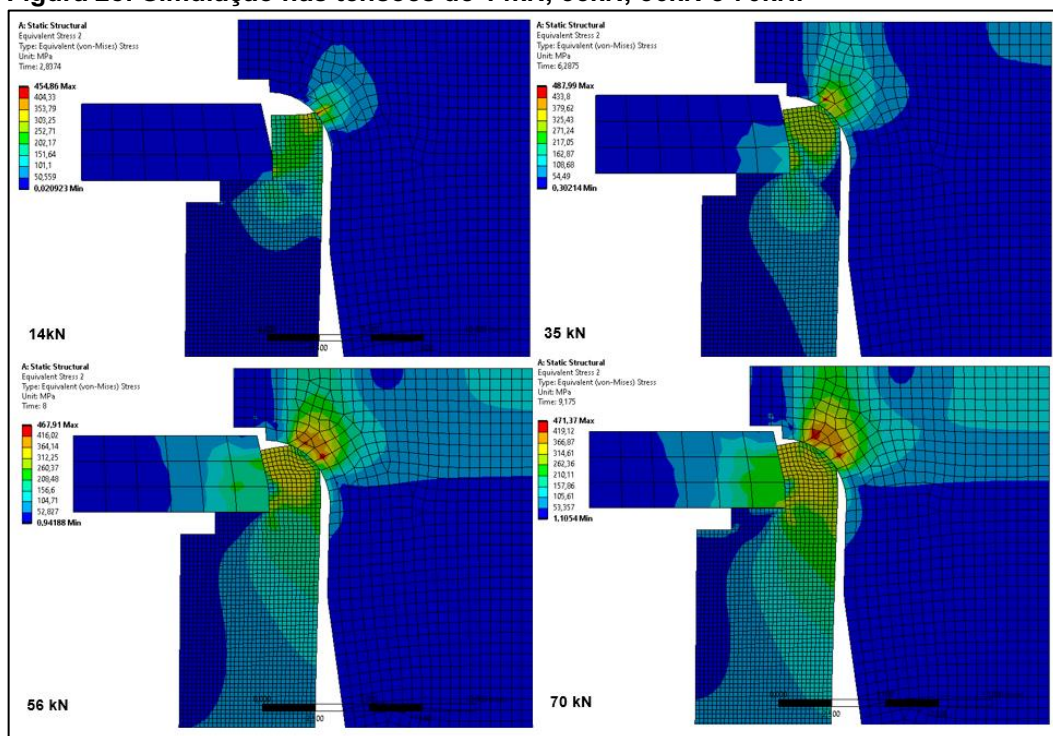
Fonte: Autoria própria.

Pode-se verificar que a maior dispersão se encontra na amostra zero, devido a mesma ter passado pelo processo de conformação.

4.4 ANÁLISE NUMÉRICA

Na simulação realizada via Ansys ® 2019 versão R2, aplicou-se a tensão de 70kN. Na Figura 28, temos as simulações nas tensões de 14kN, 35kN, 56kN e 70kN.

Figura 28: Simulação nas tensões de 14kN, 35kN, 56kN e 70kN.

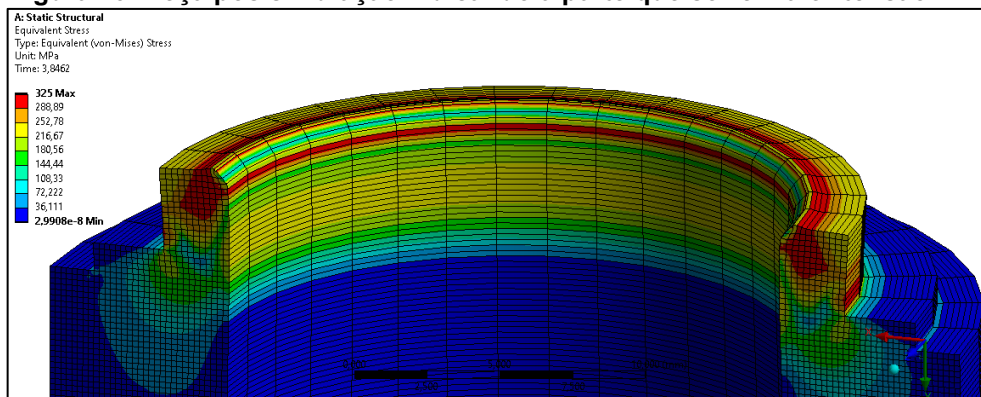


Fonte: Autoria própria.

De acordo com a simulação é possível perceber que nessa liga, na tensão de 35kN inicia o processo de dobramento, e nas tensões subsequentes, de 56 e 70kN, a tensão interna aumenta gradativamente.

Na Figura 28, é possível verificar que a área em vermelho é o ponto que apresenta maior tensão, sendo justamente o ponto que ocorre a fratura, o que confirma outro ponto verificado no ensaio Vickers, que a maior dureza se encontra na área dobrada.

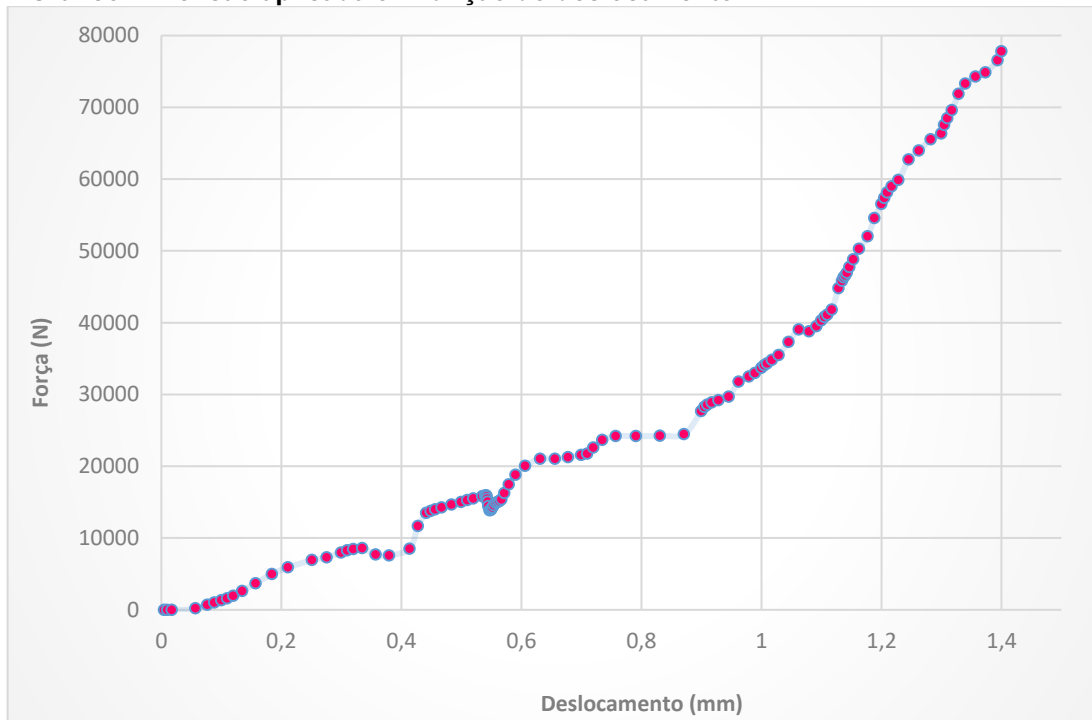
Figura 29- Peça pós simulação indicando a parte que sofre maior tensão



Fonte: Autoria própria.

Abaixo temos o gráfico (Gráfico 2) da tensão aplicada em função do deslocamento na simulação.

Gráfico 2: Tensão aplicada em função do deslocamento



Fonte: Autoria própria.

Aplicando-se a tensão de 7kN, para um deslocamento do pino de dobra de 1,4mm, teremos uma região de dobra que alcança valores críticos de tensão, conforme Figura 29.

4.5 RAIOS MÍNIMOS

Para encontrar o raio mínimo, utilizando a equação trazida pela figura 4. Na Tabela 2 foi selecionado o fator de correção referente ao alumínio recozido com a direção de laminação paralela. Utilizando o valor da espessura de 1,93, conforme medido no 3D. Portanto o raio mínimo será:

$$R_{\min} = 0,2 * 1,93$$

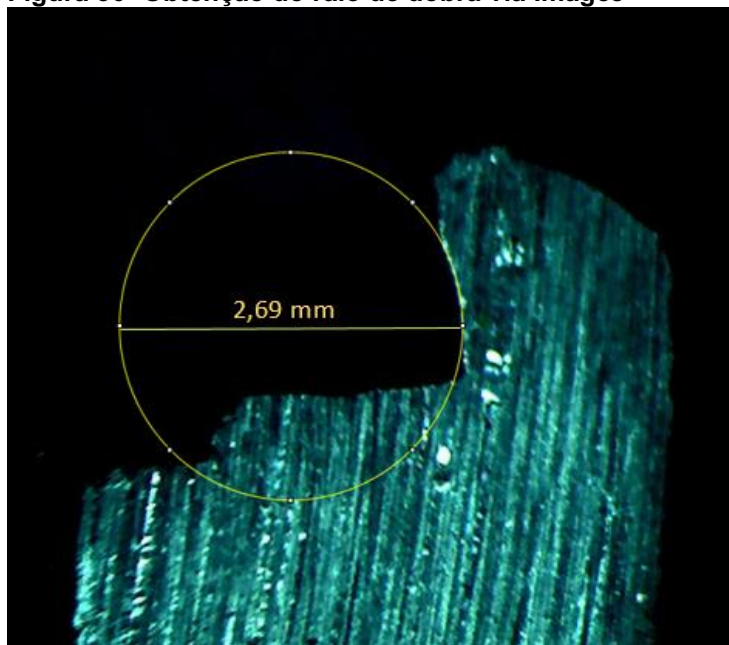
$$R_{\min} = 0,386$$

Sendo assim, o raio mínimo de dobra calculado é de 0,386mm.

Para método de comparação, foi utilizado o *software* ImageJ³, pós calibração, para encontrar o valor real do raio de dobra.

Na Figura 30 está especificado o valor de dobra obtido pelo *software* ImageJ.

Figura 30- Obtenção do raio de dobra via ImageJ



Fonte: Autoria própria

Sendo assim, pode-se concluir, que o raio mínimo de dobra é atendido, consequentemente, a peça não falha devido ao não atingimento do raio.

³ <https://imagej.nih.gov/ij/>

CONCLUSÃO

Nos dados obtidos via ensaio de dureza, é possível observar que a região conformada possui um aumento de significativo de discordâncias, ou seja, atinge maior dureza, comparada as outras regiões. Com base nisso, os resultados obtidos via simulação, confirmam que a região dobrada é a que terá uma maior solicitação, e para esse material, atinge o limite máximo de tensão.

Já de acordo com o ensaio MEV, foi possível observar o surgimento de intermetálicos do tipo α na liga SAE 306, sendo em maiores proporções nas amostras do tipo 0. Sendo na literatura, esses intermetálicos apontados como extremamente duros, mais propícios a falhar.

Desta forma, pode-se concluir, que a concentração de tensão na região de dobra, ao encontrar os intermetálicos ocasionam o surgimento de trincas, sendo essas trincas propagadas por inúmeros poros encontrados nas amostras.

Pode-se concluir também que o raio de dobra se encontra dentro do mínimo solicitado via literatura. Não havendo falhas devido ao mesmo.

Para se ter um melhor controle de peças falhadas, o controle espectrométrico da liga se faz necessário, visto que no processo de reciclagem, galhos e peças com falha de injeção retornam para o forno. Nesse processo de retorno dos scraps, se não houver um controle químico, terão a ocorrências de falhas decorrentes da liga.

REFERÊNCIAS

ABAL. Associação Brasileira do Alumínio: ABAL. **Aplicações do Alumínio-Automotivo e Transportes**. 2017. Disponível em: <<http://abal.org.br/aplicacoes/automotivo-e-transportes/>>. Acesso em: 02 mai. 2019.

AIAG. Manual de Referência. **Análise de modo e efeitos de falha potencial**. 2000.

APOSTILA DE FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO **Universidade Federal do Paraná Setor de Tecnologia Departamento de Engenharia Mecânica Fundição** - Curitiba junho 2007.

ASKELAND, D. R; WENDELIN, J. W. **Ciência e engenharia dos materiais**. 4. ed. 2008.

ASM INTERNATIONAL, **Handbook Volume 15 Casting**, Manual, EUA, 1998.

ASM INTERNATIONAL, **Specialty Handbook Aluminum and aluminum alloys**, Manual, EUA, 1993

BINDT. **British Institute Of Non-Destructive Testing**. 2019. Disponível em: <<https://www.bindt.org/>>. Acesso em: 03 jun. 2019.

CALLISTER, W. **Ciência E Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Grupo Gen-LTC, 2002.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica - Processos de Fabricação e Tratamento**. 2 ed. São Paulo: Mc-Grae Hill, Vol. 2. 1986b.

DIETER, G.E. **Metalurgia Mecânica**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1981.

DRIVEALUMINUM. **Aluminum is Growing**. 2015. Disponível em: <<https://www.drivealuminum.org/aluminum-101/>>. Acesso em: 02 mai. 2019.

ELSMAR. **FMEA - Failure Modes and Effects Analysis**. 28 jan. 2004. Disponível em: <<https://elsmar.com/FMEA/>>. Acesso em: 03 jun. 2019.

ENGETELES. **FMEA: O que é e como fazer**. 2019. Disponível em: <<https://elsmar.com/FMEA/>>. Acesso em: 03 jun. 2019.

FILLETI, A. **As novas Aplicações para o alumínio na indústria automotiva – ABAL**. 7 de jun 2016. 72 slides.

GARCIA, A; SPIM J.A; SANTOS C.A. **Ensaaios dos materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro. 2012.

MALAVAZI, J. **SENAI: Processo de fundição sob pressão**. Osasco. 2005.

MITTERER,C. **Application of hard coatings in aluminium die casting - soldering, erosion and thermal fatigue behaviour**. 2000.

ROSA, E.D. **Análise de resistência mecânica – mecânica da fratura e fadiga**. Florianópolis: UFSC, 2012.

SGS. **Ensaaios não destrutivos- O que é preciso saber?** 2018.

SOUZA, S.A. **Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos teóricos e práticos**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.

VENDRAMIM, J.C; ENOKIBARA, F.; **Considerações sobre a vida útil de moldes para fundição de alumínio sob pressão**. Informe técnico Isoflama, 2008.

ZOLIN, I. **Ensaio Mecânicos e Análises de Falhas**. ETEC- Brasil. 3. ed. 2010.

NBR13284 - **Preparação de corpos de prova para análise metalográfica**. Rio de Janeiro, ABNT, 1995

XAVIER, C. M. **Análise de modelos submalha em elementos finitos**. 2008. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

ANSYS®. **Help Viewer**. 2019

WEAVER, W. J.; JOHNSTON, P. R. **Finite Elements for Structural Analysis**. Ed. Prentice Hall Inc., New Jersey, 1984, 403 p.

ANTONIACOMI e SOUZA, **A Técnica Dos Múltiplos Domínios Aplicada À Geração De Malhas No Software Ansys Cfx-Mesh**. Conen 2010, Campina Grande, Paraíba.

OWEN, S.J., **A survey of unstructured mesh generation technology**, in: Proc. 7th Internat. Meshing Roundtable, Dearborn, MI, USA, October 1998.

ROOY, E.L.; **Introduction to Aluminum and Aluminum Alloys & Aluminum Foundry Products**. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Metals Handbook, 19th ed. Ohio, 1988 v. 9.

HELMAN, Horacio; CETLIN, Paulo Roberto. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2. ed. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, c1993. 170 p.

ZAVAGLIA, Cecília A.C.; GOMES, Edson; FILHO, Ettore B.; BUTTON, Sérgio T.; NERY, Fernando A.C. **Conformação plástica dos metais**. 5. ed. Campinas: CLE/UNICAMP, 1997. 385 p.

GONZÁLEZ, P. C. S. **Técnica não Convencional para Dobramentos de Tubos de Parede Fina Usando Elastômero**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Tese apresentada à Divisão de Pós-Graduação, p.150, 2000. São José dos Campos – SP. Disponível em: <http://161.24.11.4/tesesdigitais/000444759.pdf>.

Van der Voort, G. **“Optical Microscopy”**, “Metals Handbook Vol. 9, (th edition, American Society for Metals, 1985.

James L.McCall, P.M. French, **Metallography in failure analysis**. 1978

MANNHEIMER, W. A. **Microscopia dos Materiais - Uma introdução**. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais, 2002.

BA Dedavid, CI Gomes, G Machado, **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. Porto Alegre, 2007

CORRADI, Christiano A. L. **Metalurgia das ligas de alumínio e tratamento no metal líquido**. Itaúna: SENAI MG, 2001. 122 p.

KLEINE, A.; GARTHOFF, C.; PRIES, H; DELLEMANN, J; HOFFMANN, F **Caracterização das Propriedades da Liga EN AC-ALSi9Cu3(Fe) para Fundição Sob Pressão**. Traduzido por Themistocles Rodrigues Júnior. Revista Fundição e Serviços, Aranda Editora, nº252, dezembro 2013, p. 52-61.

FUOCO, R.; MOREIRA, Marcelo F. **Ligas de Alumínio Fundidas**. 2005. Disponível em <<http://www.dalmolim.com.br/EDUCACAO/MATERIAIS/Biblimat/aluminiofund.pdf>> Acesso em 3 jun. 2019

RODRIGUES, J.; MARTINS, P.: **Tecnologia Mecânica – Tecnologia da deformação plástica** Vol II Aplicações Industriais. Editora Escolar. Lisboa, 2010.