



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO, DE CIÊNCIAS EXATAS E EDUCAÇÃO
COORDENADORIA ESPECIAL DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Guilherme Roemers Moacyr

**Investigação dos mecanismos de danos em uma sobre-mesa de prensa de
estampagem progressiva de chapas de aplicação elétrica**

Blumenau

2023

Guilherme Roemers Moacyr

Investigação dos mecanismos de danos em uma sobre-mesa de prensa de estampagem progressiva de chapas de aplicação elétrica

Trabalho de Conclusão de Curso submetida ao curso de Engenharia de Materiais do Campus Blumenau da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Wanderson Santana da Silva

Blumenau

2023

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
Através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.**

Moacyr, Guilherme Roemers

Investigação dos mecanismos de danos em uma sobre-mesa de prensa de estampagem progressiva de chapas de aplicação elétrica / Guilherme Roemers Moacyr ; orientador, Wanderson Santana da Silva, 2023.

80 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, Graduação em Engenharia de Materiais, Blumenau, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Materiais. 2. Danos em Prensas de Estampagem. 3. Fretting. 4. Análise Microestrutural. I. Silva, Wanderson Santana da. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Materiais. III. Título.

Guilherme Roemers Moacyr

Investigação dos mecanismos de danos em uma sobre-mesa de prensa de estampagem progressiva de chapas de aplicação elétrica

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro de Materiais e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina.

Blumenau, 27 de novembro de 2023.

Insira neste espaço a
assinatura digital

Guilherme Roemers Moacyr
Acadêmico

Banca Examinadora

Insira neste espaço a
assinatura digital

Prof. Dr. Wanderson Santana da Silva
Orientador

Insira neste espaço a
assinatura digital

Prof. Dr. Cristiano da Silva Teixeira
Instituição: Universidade Federal de Santa Catarina

Insira neste espaço a
assinatura digital

Profa. Dra. Selene de Souza Siqueira
Instituição: Universidade Federal de Santa Catarina

Insira neste espaço a
assinatura digital

Sr. Eng. Ricardo Junges
Instituição: WEG Equipamentos Elétricos S. A.

Blumenau, 2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos:

À Universidade Federal de Santa Catarina e à empresa WEG Equipamentos Elétricos S.A. pela oportunidade de conduzir esta pesquisa e confiança na realização do estudo;

Ao meu orientador, Wanderson Santana da Silva, pela orientação dedicada, incentivo constante e pelo compartilhamento valioso de conhecimento técnico ao longo do estudo;

Aos professores doutores membros da banca: Cristiano da Silva Teixeira, Selene de Souza Siqueira pelas contribuições realizadas e Márcio Roberto da Rocha pela disponibilidade;

Ao meu gestor e membro da banca, Sr. Ricardo Junges, por todo o incentivo, contribuições, partilha de experiências e interesse em relação ao trabalho executado;

Aos analistas do Setor de Engenharia de Manutenção, Douglas Roberto Petry, Geovani Luiz Kleinschmidt e Gustavo Colombo Chiari, pela inestimável ajuda e compartilhamento de conhecimento;

Aos técnicos de manutenção do Setor de Estamparia, Wanderlei Paholski e Lucas Natanael Silveira Souza, por apresentarem o problema e discutirem sobre as ideias para solucioná-lo;

Aos projetistas de ferramentas de estampagem, Jackson Henrique Maas e Sérgio Gerent, por compartilharem sua valiosa experiência e conhecimento, contribuindo para a busca de soluções;

De maneira geral, à Equipe P&D e Metrologia da WEG, assim como à empresa terceira TopTest, pela realização de ensaios e análises cruciais para o desenvolvimento do estudo.

Por fim, expresso minha gratidão à minha namorada, Ana Vitória Hosana Barbosa de Albuquerque, por todo o apoio emocional e colaboração na execução deste estudo, e aos meus pais, pela oportunidade de realizar esta graduação.

RESUMO

Sobre-mesas de prensas de estampagem progressiva, utilizadas na produção de rotores e estatores de motores elétricos, têm sofrido danos superficiais durante o processo produtivo. Esses danos resultam em variações dimensionais, custos elevados de manutenção corretiva nos componentes da prensa e ferramentas de estampagem, além de rebarbas excessivas nas peças produzidas. O estudo tem como objetivo identificar as causas e a magnitude dos danos na sobre-mesa, propondo estratégias preventivas para reduzir os custos associados à manutenção. A análise abrange possíveis causas de variações dimensionais, como tensão concentrada, desgaste por *fretting* e erros em dimensões e tolerâncias. Contramedidas investigadas incluem a seleção de materiais, têmpera e revenimento, normalização, cementação e nitretação. A análise química revelou que o material da sobre-mesa é o aço DIN 1.2312 (AISI P20+S), um aço de baixa liga com baixa dureza e resistência mecânica, especialmente no estado recozido. A análise microestrutural confirmou a presença de uma microestrutura consistente com a de um aço recozido, composta de ferrita e perlita, além de indícios de danos decorrentes de *fretting*, como microtrincas e regiões com pequenos arrancamentos de partículas. Medições de dureza e rugosidade, análise dimensional e simulações de esforços por meio de análise de elementos finitos foram realizadas para avaliar a intensidade dos danos. Os resultados indicam que o material atual (aço DIN 1.2312) é inadequado devido à sua microestrutura e propriedades. Soluções propostas incluem a substituição do material por aços AISI 4140 temperado e revenido ou AISI 1045 normalizado, tratamentos superficiais de nitretação à plasma, substituição do material das réguas do calço das ferramentas e implementação de réguas de AISI 4140 temperado e revenido na sobre-mesa. Em suma, o estudo destaca a urgência de abordar os danos na sobre-mesa das prensas de estampagem, fornecendo uma análise abrangente das causas, impactos e soluções potenciais, com ênfase na redução dos custos de manutenção e na melhoria da eficiência do processo produtivo na empresa.

Palavras-chave: Danos em prensas de estampagem; *fretting*; análise microestrutural.

ABSTRACT

Progressive stamping press tables, used in the production of rotors and stators for electric motors, have been experiencing surface damage during the production process. These damages result in dimensional variations, high corrective maintenance costs for press components and stamping tools, as well as excessive burrs on the produced parts. The study aims to identify the causes and magnitude of the damage to the table, proposing preventive strategies to reduce maintenance-associated costs. The analysis encompasses potential causes of dimensional variations, such as localized stress, fretting wear, and errors in dimensions and tolerances. Investigated countermeasures include material selection, quenching and tempering, normalization, carburization, and nitriding. Chemical analysis revealed that the material of the stamping table is DIN 1.2312 steel (AISI P20+S), a low-alloy steel with low hardness and mechanical resistance, especially in the annealed state. Microstructural analysis confirmed the presence of a microstructure consistent with annealed steel, composed of ferrite and pearlite, along with evidence of fretting-related damage, such as microcracks and regions with small particle pullouts. Hardness and roughness measurements, dimensional analysis, and finite element analysis simulations were conducted to assess the intensity of the damage. The results indicate that the current material (DIN 1.2312 steel) is inadequate due to its microstructure and properties. Proposed solutions include replacing the material with tempered and quenched AISI 4140 or normalized AISI 1045 steels, plasma nitriding surface treatments, replacing the material of the tool shimming bars, and implementing tempered and quenched AISI 4140 bars on the stamping table. In summary, the study emphasizes the urgency of addressing the damage to the stamping press table, providing a comprehensive analysis of the causes, impacts, and potential solutions, with a focus on reducing maintenance costs and improving the efficiency of the production process at the company.

Keywords: Damage in stamping press tables; fretting; microstructural analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sobre-mesa de prensa de estampagem. Região com danos (a) e sem danos (b).	14
Figura 2 - Ferramenta de estampagem e sobre-mesa na cabine de estampagem. ...	15
Figura 3 - Representação gráfica da sobre-mesa da prensa de estampagem. Posição do rebaixo e superfície superior.	15
Figura 4 - Representação gráfica de uma ferramenta de prensa de estampagem. Posição do berço, calço e régua.	16
Figura 5 - Ilustração esquemática do processo de cisalhamento por meio do sistema punção e matriz.....	21
Figura 6 - Prensa de estampagem progressiva Schuler E-30.....	22
Figura 7 – Desenho esquemática da prensa Schuler.....	23
Figura 8 - Cabine de estampagem.	24
Figura 9 - Estampos da prensa de estampagem progressiva.	25
Figura 10 - Motor Elétrico. Posição do rotor e estator.	26
Figura 11 - Peças produzidas por estampagem progressiva para produção de rotores e estatores de motores elétricos.	27
Figura 12 - Estator finalizado.....	28
Figura 13 - Desenho da sobre-mesa das prensas rápidas Schuler.....	29
Figura 14 - Microestruturas típicas dos aços da Serie P. Estado recozido (a), com presença de ferrita (branco) e perlita (preto) e estado duplamente temperado (b) com a presença de martensita em toda a estrutura.	31
Figura 15 - Perfil de variação de dureza HRC (esquerda) e limite de escoamento compressivo (direita) do aço AISI 4140 com base no tratamento térmico realizado.	32
Figura 16 - Microestrutura do AISI 4140 normalizado (a) e temperado/revenido (b).	33
Figura 17 - Representação esquemática do fenômeno de <i>fretting</i>	35
Figura 18 – Diagrama Tensão x Deformação esquemático do comportamento de materiais recozidos, temperados e temperados e revenidos.	38
Figura 19 - Microestrutura do aço AISI 4140 temperado e revenido e nitretado com camada branca (a) e com zona difusa de nitretos (b).	41
Figura 20 - Diferentes regiões da sobremesa. Superior sem problemas "A"; superior afetada "B"; rebaixo sem problemas "C"; rebaixo afetada "D"; lateral próxima da superfície afetada "E"; lateral longe da superfície "F"	43

Figura 21 - Mesa da prensa (a) e variações dimensionais na mesa (b)	44
Figura 22 - Ferramenta de estampagem. Posição do berço e da régua do calço.	44
Figura 23 - Amostra de material da sobre-mesa de prensa de estampagem.....	45
Figura 24 - Etapas do ensaio metalográfico <i>In Loco</i> . (a) Limpeza da superfície; (b) Lixamento; (c) Polimento; (d) Análise com microscópio.	47
Figura 25 - Região de coleta do óleo para verificação da existência de partículas ferromagnéticas.....	48
Figura 26 - Nível eletrônico Wyler Cód. 21370.....	49
Figura 27 - Relógio Comparador Mitutoyo N°204065.....	49
Figura 28 - Dispositivo de Medição de Cota de Profundidade.....	50
Figura 29 - Durômetro Manual Leeb's Hardness Tester TH130.....	51
Figura 30 - Rugosímetro portátil Mitutoyo SJ-210.....	52
Figura 31 – Vista superior (a) área de aplicação de força (vermelho) e vista inferior (b) área de apoio (azul) utilizadas para a simulação de esforços estáticos.....	53
Figura 32 - Malha utilizada para a simulação de esforços estáticos.	53
Figura 33 - Microestrutura da região “A” da sobre-mesa em aço DIN 1.2312. Ferrita e Perlita. Reagente Nital 4%, aumento 100x (a) e 400x (b).	56
Figura 34 - Microestrutura da região “B” da sobre-mesa em aço DIN 1.2312. Ferrita e Perlita. Reagente Nital 4%, aumento 100x (a) e 400x (b).	57
Figura 35 - Microestrutura da região “E” da sobre-mesa em aço DIN 1.2312. Ferrita e Perlita. Reagente Nital 4%, aumento 100x (a) e 400x (b).	58
Figura 36 - Microestrutura da região “F” da sobre-mesa em aço DIN 1.2312. Ferrita e Perlita. Reagente Nital 4%, aumento 100x (a) e 400x (b).	58
Figura 37 - Verificação de partículas magnéticas no óleo da mesa de estampagem. Sem aproximação de um ímã (a). Com ímã aproximado (b).	60
Figura 38 - Gráfico 3D de avaliação de planeza da sobre-mesa.....	61
Figura 39 - Resultados da simulação de tensão equivalente (Von-Mises) na sobre-mesa em aço DIN 1.2312 em vista isométrica (a) e em corte de seção (b).	67
Figura 40 - Resultados da simulação de deformação total na sobre-mesa em aço DIN 1.2312 em vista isométrica (a) e em corte de seção (b).....	67
Figura 41 – Protótipo da proposta referente à implementação de régua de aço AISI 4140 temperado e revenido na região do rebaixo da sobre-mesa.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Gastos referentes à correção dos danos na sobre-mesa, mesa e sobre-placa de prensas de estampagem	17
Tabela 2 - Composição típica do aço AISI P20.	30
Tabela 3 - Composição Típica do aço AISI 4140.	31
Tabela 4 - Propriedades dos aços AISI 4140 normalizado e DIN 1.2312 recozido. ...	54
Tabela 5 - Resultados de análise química da amostra comparação com liga DIN 1.2312 e AISI 4140.....	55
Tabela 6 - Medidas com relógio comparador das regiões afetadas na parte superior da sobremesa "B", no rebaixo "D", na mesa da prensa "G" e no calço da ferramenta "H".	61
Tabela 7 - Medições com dispositivo de cota de profundidade na região sem danos "C" e com danos "D".....	63
Tabela 8 - Mapeamento de durezas na sobre-mesa, mesa e ferramenta de estampagem.....	64
Tabela 9 - Medidas de rugosidade média R_a	65
Tabela 10 - Medidas de rugosidade máxima R_{max}	65
Tabela 11 - Comparação de Tensão Equivalente Máxima (MPa) e Deformação Total Máxima (mm) para os aços DIN 1.2312 Recozido e AISI 4140 Normalizado.	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Computer Aided Design
DIN	Deutsches Institut für Normung
FEA	Finite Element Analysis
HB	Hardness Brinell
HRC	Hardness Rockwell C
ICP-OES	Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectroscopy
LE	Limite de Escoamento
LRT	Limite de Resistência à Tração
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura

SUMÁRIO

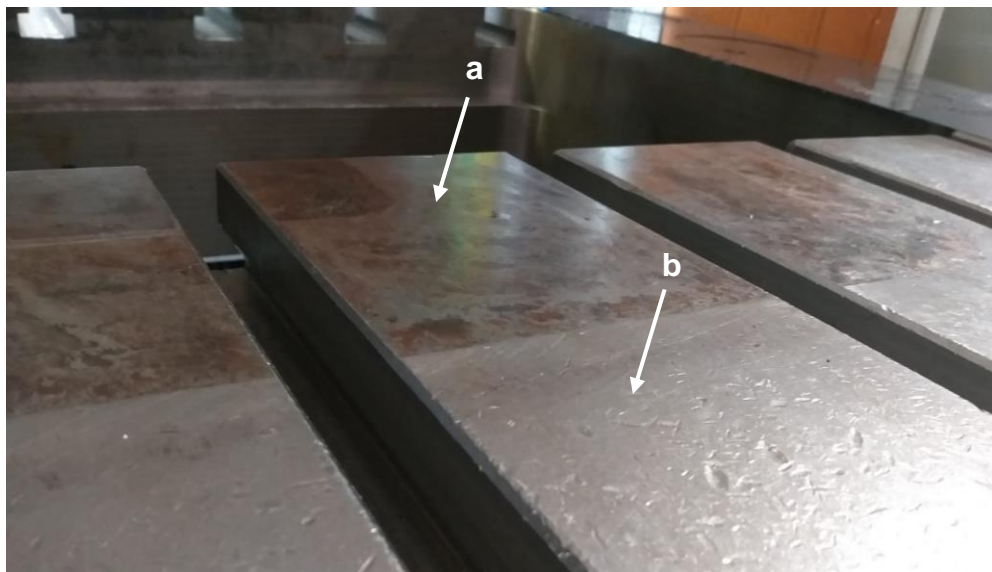
1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	19
2.1	OBJETIVO GERAL	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1	PROCESSO PRODUTIVO	20
3.1.1	Estampagem Progressiva	20
3.1.2	Prensa de Estampagem	22
3.1.3	Peças e Equipamentos Produzidos	25
3.2	SOBRE-MESA DA PRENSA DE ESTAMPAGEM	28
3.3	AÇOS UTILIZADOS EM SOBRE-MESAS DE PRENSAS	29
3.3.1	Aços PX Series	29
3.3.2	AISI 4140	31
3.4	POSSÍVEIS CAUSAS DAS VARIAÇÕES DIMENSIONAIS	33
3.4.1	Tensão Concentrada	33
3.4.2	Fretting	34
3.4.3	Dimensões e Tolerâncias	35
3.5	POSSÍVEIS CONTRAMEDIDAS.....	36
3.5.1	Seleção de Materiais	36
3.5.2	Têmpera e Revenimento	37
3.5.3	Normalização	38
3.5.4	Cementação e Nitretação	39
3.6	SIMULAÇÃO DE ESFORÇOS	41
3.6.1	Análise de Elementos Finitos	41
4	METODOLOGIA	43
4.1	ANÁLISE QUÍMICA.....	45
4.2	ANÁLISE MICROESTRUTURAL IN LOCO	46
4.3	VERIFICAÇÃO DE PARTÍCULAS DECORRENTES DE DESGASTE.....	47
4.4	ANÁLISE DIMENSIONAL	48
4.4.1	Medição de Planeza	48
4.4.2	Medição com Relógio Comparador	49
4.4.3	Medição com Dispositivo de Cota de Profundidade	50

4.5	MEDIÇÃO DE DUREZA.....	51
4.6	MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE	51
4.7	SIMULAÇÃO DE ESFORÇOS	52
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
5.1	ANÁLISE QUÍMICA.....	55
5.2	ANÁLISE MICROESTRUTURAL IN LOCO	56
5.3	VERIFICAÇÃO DE PARTÍCULAS DECORRENTES DE DESGASTE.....	59
5.4	ANÁLISE DIMENSIONAL	60
5.4.1	Medição de Planeza	60
5.4.2	Medição com Relógio Comparador	61
5.4.3	Medição com Dispositivo de Cota de Profundidade.....	62
5.5	MEDIÇÕES DE DUREZA	63
5.6	MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE	65
5.7	SIMULAÇÃO DE ESFORÇOS.....	66
5.8	PROPOSTAS CORRETIVAS.....	69
5.8.1	Substituição Completa do Componente	69
5.8.2	Tratamentos Térmicos ou Termoquímicos no Componente.....	69
5.8.3	Aplicação de Régua Intercambiáveis na Sobre-mesa	70
5.8.4	Aumentar a Folga Entre Superfícies em Contato Indevido	71
6	CONCLUSÃO	72
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	74
	REFERÊNCIAS.....	75

1 INTRODUÇÃO

Prensas de estampagem progressiva são equipamentos utilizados para a realização de cortes em chapas metálicas na produção de rotores e estatores de motores elétricos, produzidos pela empresa WEG Equipamentos Elétricos S. A. Um componente fundamental para esse processo é a sobre-mesa da prensa de estampagem, que tem sido afetado por danos superficiais consideráveis durante seu processo produtivo na empresa, o que tem gerado implicações significativas, especialmente em relação às variações dimensionais nesse componente, aos gastos de manutenção corretiva da sobre-mesa e das ferramentas de estampagem, além de excessivas rebarbas nas peças produzidas e interrupções na produção. Na Figura 1 é possível notar a clara diferença entre a região afetada (a) e a região não afetada (b) do componente.

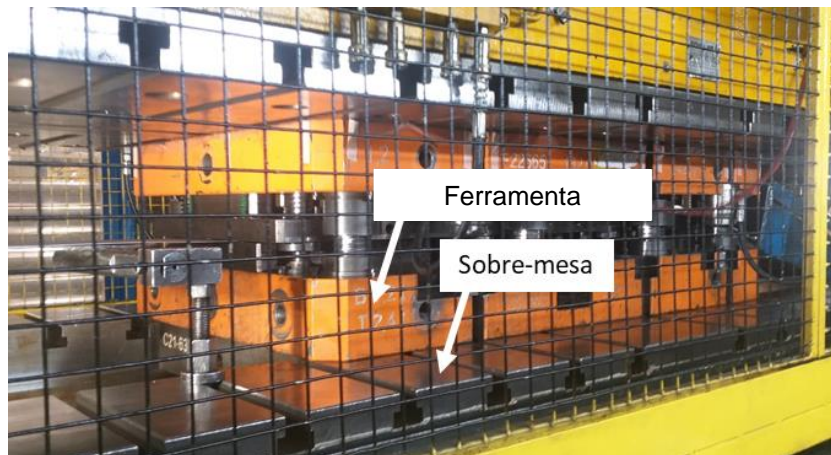
Figura 1 – Sobre-mesa de prensa de estampagem. Região com danos (a) e sem danos (b).



Fonte: Autor (2023).

Esses danos decorrem da interação entre dois componentes fundamentais do processo de estampagem, que são a sobre-mesa e a ferramenta de corte, cujas posições podem ser visualizadas na Figura 2.

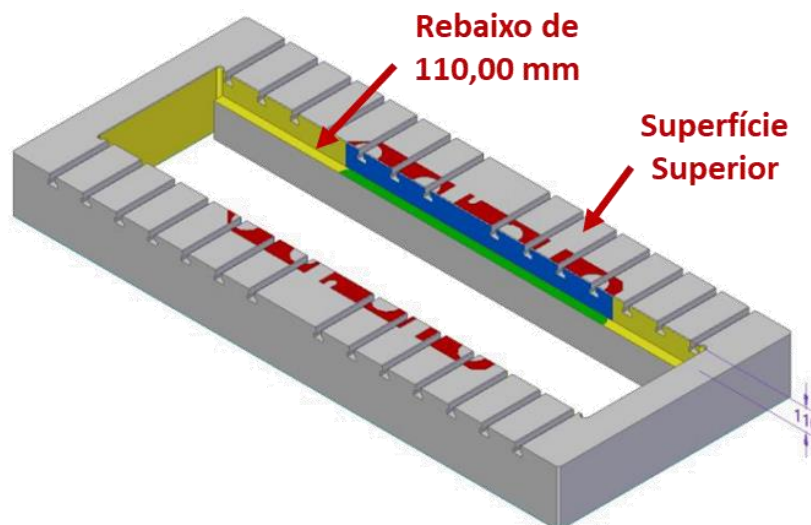
Figura 2 - Ferramenta de estampagem e sobre-mesa na cabine de estampagem.



Fonte: Autor (2023).

A sobre-mesa deveria originalmente ser fabricada com aço AISI 4140, passando pelo processo de normalização e atingindo a dureza de 35 HRC. No entanto, devido aos danos identificados, uma metodologia foi implementada para verificar se a sobre-mesa apresenta o material adequado. A Figura 3 mostra uma representação gráfica desse componente, com indicação do rebaixo de 110,00 mm e da superfície superior. O apoio da ferramenta deve ocorrer somente na área em verde, sem que exista contato na área representada em vermelho. A área em azul indica a superfície que fica próxima à lateral do calço da ferramenta.

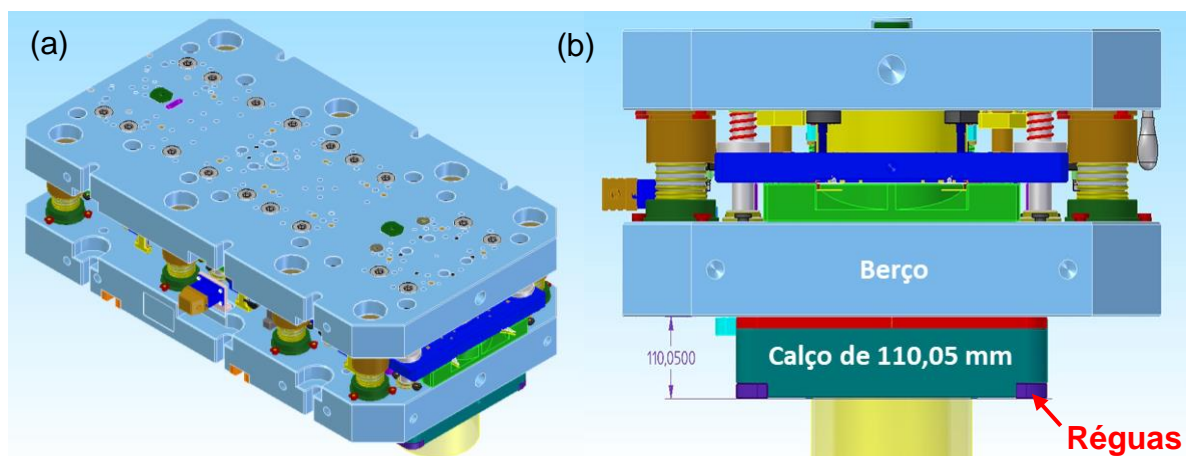
Figura 3 - Representação gráfica da sobre-mesa da prensa de estampagem. Posição do rebaixo e superfície superior.



Fonte: Autor (2023).

A Figura 4 (a), por sua vez, mostra a ferramenta de estampagem em vista isométrica e o item (b) mostra sua vista frontal, com a denominação de alguns de seus componentes. A ferramenta de estampagem, por sua vez, é composta por um calço com dimensões de 110,05 mm, conforme demonstrado no item (b). O material utilizado para o calço é o aço AISI 1020 ou 1045 laminado e deve apresentar uma dureza menor quando em comparação com a sobre-mesa, caracterizando-o como um componente de sacrifício na operação. A montagem da ferramenta na sobre-mesa é realizada de forma que ela apoie exclusivamente no rebaixo da sobre-mesa, deixando uma folga de 0,05 mm entre o berço da ferramenta e a superfície superior da sobre-mesa. Essa folga é fundamental para evitar danos por desgaste na região superior da sobre-mesa. Caso essa distância não seja respeitada, pode ocorrer o contato indevido do berço da ferramenta com a superfície superior da sobre-mesa, causando danos em ambas as peças envolvidas. Também é possível observar, na cor roxa, que são fixadas réguas para correção da altura do calço conforme a ferramenta desgasta/deforma durante o processo. Essas réguas são fabricadas no mesmo material do calço. Periodicamente as ferramentas são medidas e caso a réguas estejam excessivamente desgastadas/deformadas, elas são substituídas por novas, para manter essa dimensão.

Figura 4 - Representação gráfica de uma ferramenta de prensa de estampagem. Posição do berço, calço e réguas.



Fonte: Autor (2023).

Vale destacar, entretanto, que não é feito controle da profundidade do rebaixo da sobre-mesa, dessa maneira, conforme a sobre-mesa sofre variações dimensionais devido aos danos mostrados, a folga de 0,05 mm deixa de existir, de tal forma que

passa a ocorrer o contato indevido entre o berço da ferramenta e a superfície superior da sobre-mesa, agravando a situação.

O método atual de abordagem em relação a este problema envolve um processo custoso e disruptivo de manutenção corretiva. Quando os danos na sobre-mesa excedem um determinado limite crítico, a solução é a usinagem para correção. Isso implica em despesas significativas com mão de obra, equipamentos, ferramentas e interrupções na produção. Vale destacar que a danos na sobre-mesa ocorrem tanto na região do rebaixo quanto na superfície superior. Além disso a sobre-mesa não é o único componente da prensa que sofre danos dessa natureza. A mesa e a sobre-placa também são afetadas, entretanto, o foco do estudo está na sobre-mesa por conta de os danos serem mais evidentes nesse componente.

No que diz respeito aos gastos atuais com manutenção corretiva, os custos associados à usinagem da sobre-mesa atingem cerca de R\$ 7.000,00 a cada intervenção. Quando corrigido o conjunto todo (mesa, sobre-mesa e sobre-placa) são gastos cerca de R\$ 33.600,00 com a usinagem, além de gastos estimados de mão de obra no valor de R\$ 38.000,00 e máquina parada por três semanas, estimado em R\$ 26.000,00. É importante ressaltar que esse problema não está isolado, todas as seis prensas similares no setor enfrentam danos estruturais semelhantes, o que evidencia a necessidade de uma solução abrangente e padronizada. Valores referentes aos gastos para a correção dos danos podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 - Gastos referentes à correção dos danos na sobre-mesa, mesa e sobre-placa de prensas de estampagem

Usinagem Corretiva	Mão de obra	Máquina Parada	Total
R\$ 33.600,00	R\$ 38.000,00	R\$ 26.000,00	R\$ 97.600,00

Fonte: Autor (2023).

Foi verificado que em cerca de um mês após a correção dos danos, a prensa já se encontra com um certo desvio de planeza. Entretanto, por motivos econômicos esse procedimento é realizado apenas uma vez por ano em cada prensa, o que resulta em maiores gastos de manutenção corretiva relacionados às ferramentas de estampagem, além de rebarbas excessivas nas peças produzidas.

Em relação aos gastos de manutenção corretiva em ferramentas, o gasto médio de cada ferramenta, considerando o mês de outubro de 2023, é de R\$ 718,15. Por mês, cada prensa Schuler recebe, em média, 46 ferramentas, com base em

registros internos de preparação de ferramentas, e após o uso, todas elas são encaminhadas para a manutenção, o que implica em um valor médio de R\$ 33.034,09 com manutenção corretiva de ferramentas para cada prensa Schuler por mês, caso todas necessitem de correção. Considerando as seis prensas, esse valor fica em R\$ 198.209,40 por mês. Não é possível afirmar que todas essas manutenções possuem relação com a planeza das sobre-mesas, entretanto, análises internas verificaram que existe relação. Dessa maneira, é possivelmente justificável um investimento para a correção desses danos, visando reduzir o custo associado não só à usinagem corretiva das sobre-mesas, mas também com o intuito de reduzir os gastos com manutenção corretiva em ferramentas de estampagem.

A justificativa deste estudo está na necessidade de reduzir custos de manutenção por meio de medidas preventivas, que são abordagens mais eficientes e econômicas em comparação com a manutenção corretiva. A manutenção preventiva envolve a realização de ações planejadas com o objetivo de diminuir ou prevenir falhas ou deteriorações no desempenho de acordo com um plano preestabelecido (Pinto e Xavier, 2004 apud Dos Santos, 2019). Assim, a pesquisa visa identificar as causas dos danos na sobre-mesa e propor estratégias para evitar que eles voltem a ocorrer.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Identificar as possíveis causas e a magnitude dos danos nas sobre-mesas de prensas de estampagem progressiva, de forma a subsidiar a aplicação de estratégias preventivas para reduzir os custos associados à manutenção corretiva do problema.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Dentre os objetivos apresentados de maneira mais específica para a realização desse estudo pretende-se:

- Conduzir uma análise química de cavacos de usinagem, para verificar a composição do material da sobre-mesa de estampagem;
- Realizar uma caracterização microestrutural (micrografia *in loco*) da sobre-mesa de prensas de estampagem nas regiões com e sem danos;
- Efetuar uma verificação da existência de resíduos decorrentes de desgaste na superfície da mesa de estampagem;
- Executar uma análise mecânica (durezas) ao longo da sobre-mesa e ferramenta de estampagem;
- Desempenhar uma análise dimensional dos danos ao longo da peça, por meio de nível eletrônico à laser, relógio comparador e dispositivo de cota de profundidade;
- Exercer medidas de rugosidade das regiões com e sem danos;
- Simular e estimar as tensões a que o material da sobre-mesa de estampagem está submetido durante o processo produtivo, por meio do *software ANSYS*;
- Propor métodos para prevenir futuros danos na sobre-mesa de estampagem, incluindo a possível substituição do material, tratamentos térmicos/termoquímicos específicos e alterações no projeto, para melhorar a durabilidade da peça.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PROCESSO PRODUTIVO

3.1.1 Estampagem Progressiva

Há uma variedade de métodos de processamento de aços elétricos laminados para fabricar rotores e estatores em motores elétricos. Um dos métodos mais comuns em produções em larga escala é a estampagem progressiva, também conhecida popularmente como estampagem rápida ou estampagem de lâminas elétricas. Esse processo é executado em prensas e faz uso de ferramentas e matrizes duráveis para manipular eficientemente aços elétricos, especialmente devido ao alto volume de peças fabricadas (Kalpakjian & Schmid, 2023; Hespanhol, 2009).

A estampagem, de maneira generalizada, é o conjunto de operações com as quais, sem produzir cavaco, é possível submeter uma chapa plana a uma ou mais transformações com a finalidade de obter peças com geometrias próprias. A estampagem progressiva é um método no qual uma ferramenta de corte progressivo corta e/ou molda gradualmente o material em pequenas etapas, resultando em peças com a forma desejada (Provenza, 1986; Rodrigues, 2015).

Essa operação é executada alimentando o material em uma ferramenta que opera em sincronia com a prensa. Este processo é caracterizado pela utilização de uma série de ferramentas simples para cortar interna e externamente, de maneira simultânea. Essa técnica, comum na indústria, combina a conformação e o corte da peça na mesma chapa, resultando em significativa economia de tempo e material (Hosford & Caddell, 2018; Rodrigues & Martins, 2005 apud Piccoli, 2013).

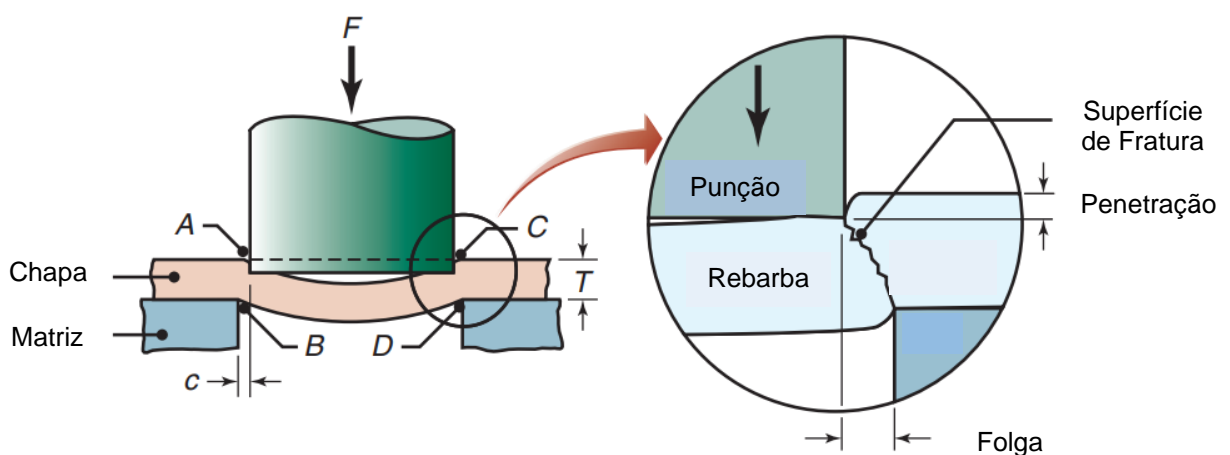
Na estampagem de aços elétricos, os fenômenos envolvidos, em que predominam estados de tensão bidimensionais em vez de tridimensionais, exigem que as matrizes e punções estejam em perfeitas condições de corte. O principal desafio é a formação de rebarbas no produto estampado, cuja altura deve ser controlada, não ultrapassando um valor pré-definido, comumente fixado em 50 μm , para não comprometer o empilhamento das lâminas (Dieter & Schmidt, 2018; Hespanhol, 2009).

Para melhor compreender a natureza dessas rebarbas é preciso compreender os esforços envolvidos no corte por cisalhamento, que ocorre durante esse processo.

Uma ferramenta de corte por cisalhamento é composta por uma punção com o formato correspondente à geometria da peça que será cortada, juntamente com uma matriz que permite a passagem da punção e das peças que são cortadas (Rodrigues & Martins, 2005 apud Piccoli, 2013). O corte é executado por meio do movimento relativo entre dois cantos afiados que passam um em frente ao outro com uma folga entre eles, o que resulta na separação do material da chapa. Essa folga é determinada pelo material e espessura da chapa cortada, geralmente em torno de 3 a 5% da espessura da chapa (Schaffer, 2004). Essas remoções podem ser realizadas tanto ao longo do perímetro externo da peça quanto nos contornos internos, como no caso da criação de furos e rasgos (Morgado, 2013).

Durante o processo de corte, o metal é inicialmente submetido a tensões de tração e compressão, até que ultrapasse o regime elástico e penetre no regime plástico. Em sequência, dá-se uma redução da área útil resistente do material até que sua capacidade de resistir se esgota e o material destaca-se completamente, resultando no corte da peça (Frateschi & Negrini, 1983). A Figura 5 ilustra o processo de cisalhamento de uma chapa metálica por meio de uma punção e uma matriz. Vale notar que as bordas não são exatamente suaves nem perpendiculares ao plano da chapa metálica, o que resulta nas rebarbas previamente mencionadas. Os pontos A, B, C e D mostram os pontos onde é iniciada a formação de trincas, que resultam na separação do material da chapa metálica (Kalpakjian & Schmid, 2023).

Figura 5 - Ilustração esquemática do processo de cisalhamento por meio do sistema punção e matriz.



Fonte: Kalpakjian & Schmid, 2023.

Portanto, se danos nos componentes da prensa de estampagem, como a sobre-mesa, e nas ferramentas de corte não forem controlados, podem surgir problemas, incluindo falhas na gestão da rebarba e, em situações mais críticas, a quebra ou desgaste prematuro das ferramentas.

3.1.2 Prensa de Estampagem

A fim de melhor compreender o processo, é importante destacar algumas características do equipamento. A máquina abordada ao longo do presente estudo trata-se de uma prensa rápida Schuler excêntrica de alto rendimento e duas colunas, modelo SAL400-2,80, adquirida pela empresa em 2012 e denominada Prensa E-30. O equipamento pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 - Prensa de estampagem progressiva Schuler E-30.



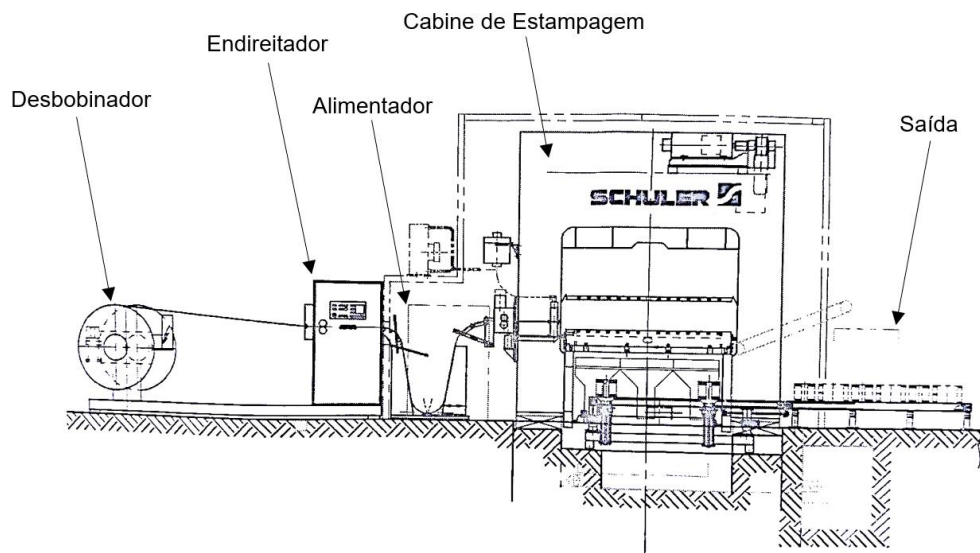
Fonte: Autor (2023).

A prensa é a ferramenta primordial para executar a maioria das operações de conformação de chapas, e o êxito na fabricação frequentemente está vinculado à escolha apropriada do tipo de equipamento. Os acionamentos excêntricos são empregados quando o curso do êmbolo é relativamente curto, como é o caso da aplicação em questão (Black & Kohser, 2008). Além disso, vale destacar que as prensas de estampagem são multifuncionais, capazes de executar diversas ações, como corte, dobra, embutimento e outras, de acordo com as ferramentas e matrizes utilizadas (Rodrigues, 2015). A prensa é composta por um desbobinador, que

continuamente desenrola a bobina de aço a ser cortada para a produção das peças desejadas. A lâmina de aço então passa pelo endireitador, que tem a função de quebrar as tensões existentes na chapa a fim de facilitar o posterior corte. Após essa etapa a chapa passa pelo alimentador, que, de maneira discreta e sincronizada com o desbobinador, alimenta a prensa para que seja realizado o corte da chapa.

É essencial que os sistemas de desbobinamento, alimentação e prensagem estejam perfeitamente sincronizados para garantir um desempenho eficaz do processo. Em cada ciclo da prensa, é realizado o corte do perfil interno e externo dos rotores e estatores, portanto, é fundamental que, antes de cada acionamento da prensa, o material seja avançado e posicionado corretamente com o auxílio de guias ou pilotos montados nas punções (Rodrigues & Martins, 2005 apud Piccoli, 2013). O corte das peças é realizado na cabine de estampagem e, por fim, as mesmas saem por uma esteira, já empilhadas na quantidade exata de chapas que compõem um rotor ou estator. O desenho esquemático da prensa Schuler, com seus principais componentes destacados pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 – Desenho esquemática da prensa Schuler.



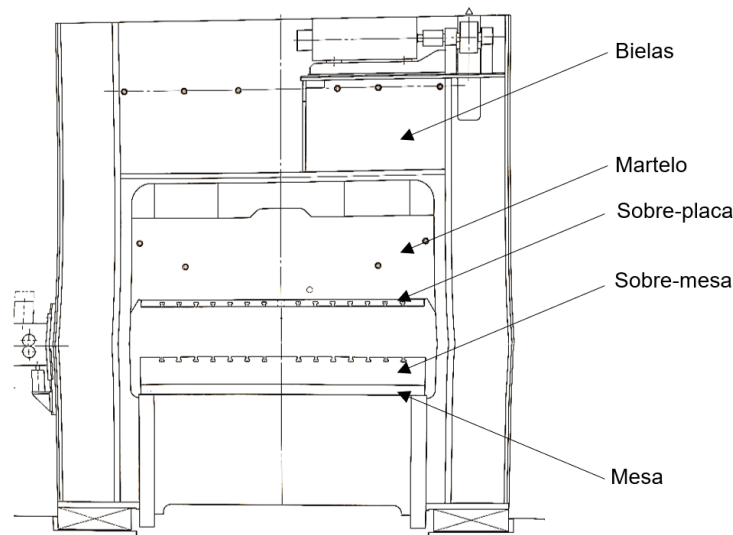
Fonte: Schuler, adaptado (2012).

A cabine de estampagem é a protagonista desse processo, onde de fato a matéria prima é transformada em uma peça, com valor agregado. Nesta fase do equipamento, ocorrem as operações de corte, que envolvem a remoção de material que inicialmente está presente na chapa, mas que não é necessário para a produção da peça final (Morgado, 2013). A cabine é composta por diversos componentes, que

garantem seu pleno funcionamento. Um motor elétrico confere ao volante o movimento de rotação. O giro é transferido às bielas, que convertem o movimento rotativo da árvore de manivelas para o movimento vertical do martelo e são projetadas para garantir uma movimentação durante o ciclo de estampagem. O martelo, por sua vez, é a parte móvel da prensa, que desce para aplicar a força sobre a chapa de metal que está sendo estampada (Andradas, 2016).

Outra peça que compõe esse equipamento é a sobre-placa, utilizada para suportar a metade superior do berço da ferramenta de corte e transferir a força do martelo de maneira uniforme sobre a peça de trabalho. A fixação do berço da ferramenta na sobre-placa é realizada por meio de rasgos em T. Já a sobre-mesa é utilizada para fixar a metade inferior do berço da ferramenta e para suportar a chapa de metal que será estampada (Andradas, 2016). Por fim, a mesa é a peça base da prensa, sobre a qual todo o conjunto é montado. Ela fornece estabilidade e suporta a estrutura da prensa, garantindo que a mesma permaneça nivelada e operacional durante o processo de estampagem. A Figura 8 mostra uma representação esquemática da cabine de estampagem de uma prensa Schuler.

Figura 8 - Cabine de estampagem.

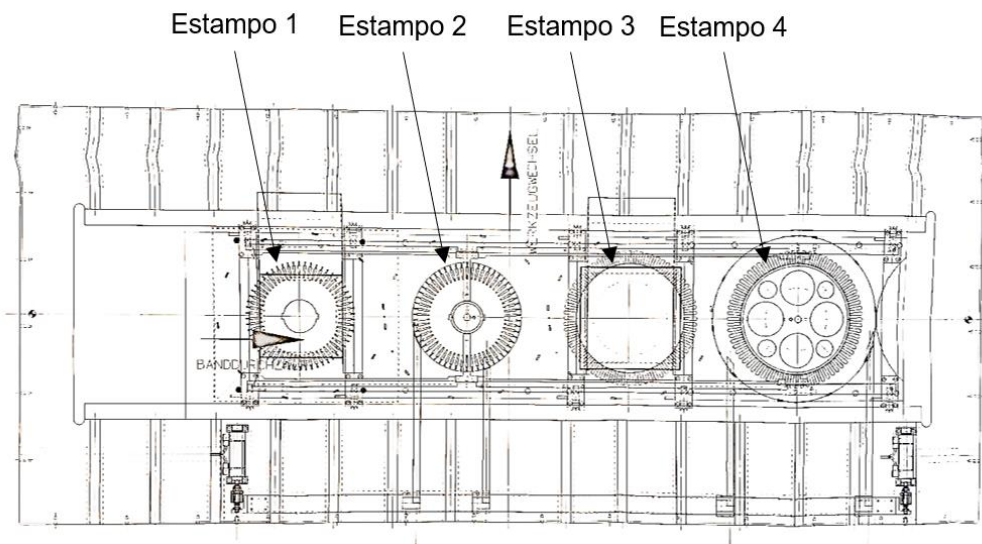


Fonte: Schuler, adaptado (2012).

O corte em si das chapas metálicas é realizado pelos estampos, que são fabricados em metal duro. Conceitualmente, estampos consistem em ferramentas de base plana, em que uma punção penetra na chapa a ser cortada, apoiada sobre uma base convenientemente furada, a matriz, obrigando a forma desejada a ser destacada

por esforço cisalhante quando a punção houver completado seu curso descendente (Frateschi & Negrini, 1983; Schey, 1987). Na Figura 9 pode-se observar uma vista superior da sobre-mesa da prensa de estampagem com os quatro estampos utilizados para fazer o corte das peças produzidas. Os dois primeiros estampos são referentes ao rotor. O Estampo 1 realiza o corte do furo interno e ranhuras enquanto o Estampo 2 realiza o corte do diâmetro externo. Já os dois estampos finais são referentes ao estator. O Estampo 3 realiza o corte das ranhuras enquanto o Estampo 4 realiza o corte do diâmetro externo e furos.

Figura 9 - Estampos da prensa de estampagem progressiva.



Fonte: Schuler, adaptado (2012).

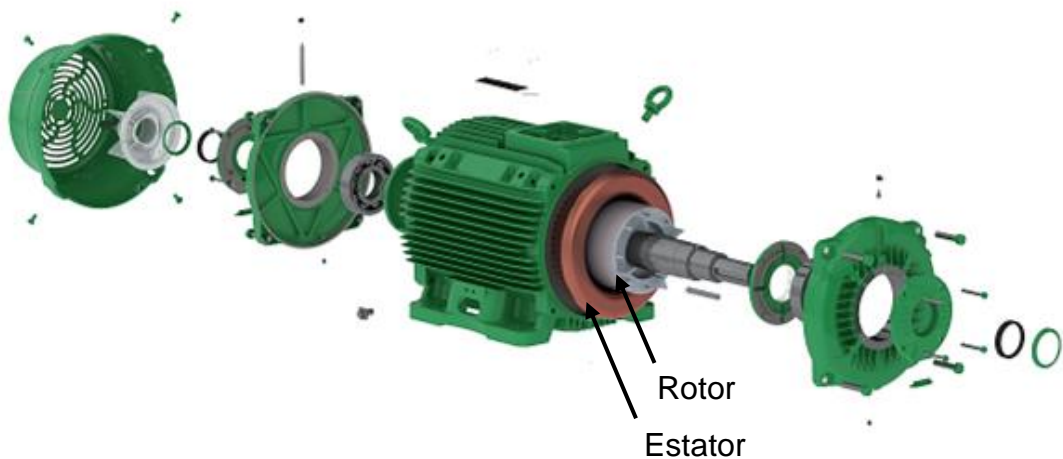
Para garantir um desempenho confiável, as prensas de estampagem requerem manutenção regular, que inclui a lubrificação das partes móveis, a verificação das ferramentas e matrizes e a inspeção dos componentes críticos. Dessa maneira, o controle de qualidade desempenha um papel crucial no processo de estampagem, e vários sistemas são empregados, como inspeções visuais, medições de espessura e verificação das dimensões da peça.

3.1.3 Peças e Equipamentos Produzidos

O processo de fabricação por estampagem progressiva é utilizado para a produção de rotores e estatores de motores elétricos na empresa WEG Equipamentos Elétricos S. A, conforme mencionado anteriormente. Motores elétricos são dispositivos

eletromecânicos amplamente utilizados na indústria moderna, que convertem energia elétrica em energia mecânica, proporcionando movimento a uma variedade de máquinas e dispositivos, desde pequenos motores em aparelhos domésticos até unidades industriais de alta potência (Kosow, 1982; Garcia, 2003). A operação eficiente desses motores depende da interação entre dois componentes principais: o rotor e o estator, que podem ser visualizados em destaque na Figura 10, que mostra a vista explodida de um motor elétrico.

Figura 10 - Motor Elétrico. Posição do rotor e estator.

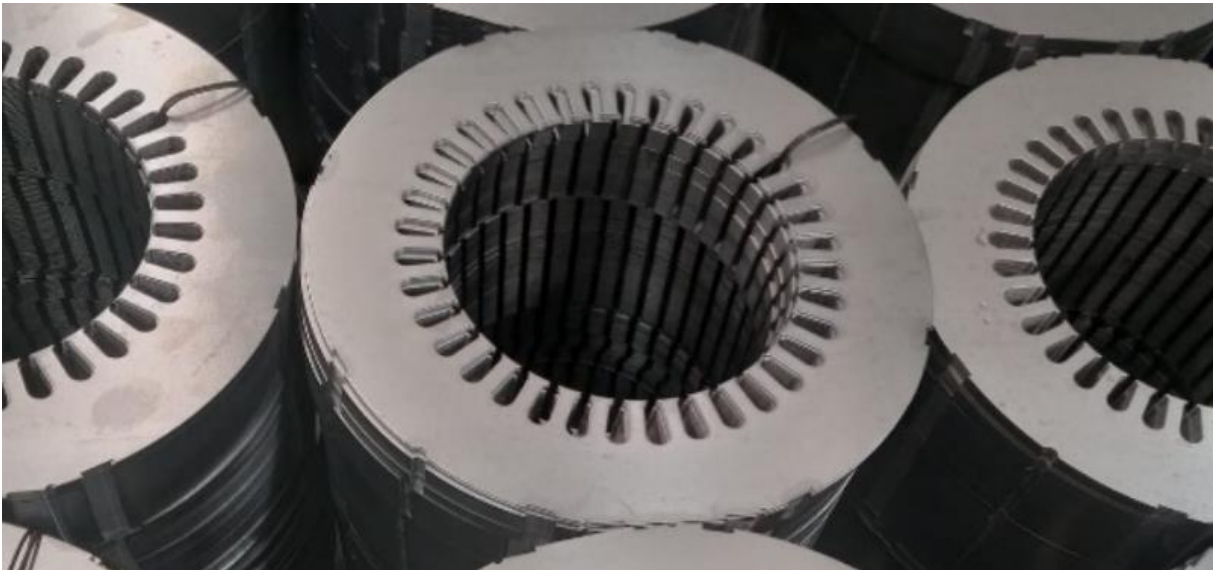


Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S.A. (2023).

O rotor é a parte móvel de um motor elétrico, responsável por girar quando uma corrente elétrica é aplicada. Sua função principal é gerar torque e, assim, criar o movimento necessário para o funcionamento do motor. O estator, por outro lado, é a parte estacionária do motor elétrico, que envolve o rotor e cria um campo magnético rotativo quando a corrente elétrica passa por ele. Esse campo magnético interage com o rotor, induzindo o movimento rotativo. A principal função do estator é fornecer um campo magnético estável e controlado (Boldea & Nasar, 2005).

O processo de estampagem é altamente eficiente para a produção desses componentes e para a produção em série (Kalpakjian & Schmid, 2023). Na empresa em questão, o processo é executado em uma frequência de 400 batidas por minuto, resultando em várias peças estampadas com as mesmas características. Na Figura 11 é possível visualizar essas peças produzidas pelo processo de estampagem progressiva.

Figura 11 - Peças produzidas por estampagem progressiva para produção de rotores e estatores de motores elétricos.



Fonte: Autor (2023).

Vale destacar que o procedimento produz uma série de placas individuais, cortadas na geometria desejada, que são empilhadas e posteriormente presas entre si com um grampo metálico para formar os rotores e estatores de motores elétricos. É de grande importância que as peças produzidas sejam estampadas a partir de chapas laminadas para que ocorra a formação de uma camada de óxidos entre elas que desempenha a função de promover isolamento elétrico. Essa propriedade é essencial para evitar perdas de carga, contribuindo para a eficiência do sistema. Comumente, essas chapas apresentam composições que incluem elementos como silício, alumínio e um baixo percentual de carbono. O tratamento térmico comum para essas chapas é o recozimento com crescimento de grão. Alternativamente podem ser utilizadas placas com um teor de carbono maior, desde que descarbonatadas durante o recozimento (Leite, 2008). Vale ressaltar que o volume de chapas estampadas tem um impacto positivo na eficiência do campo induzido. Um estator finalizado é apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Estator finalizado



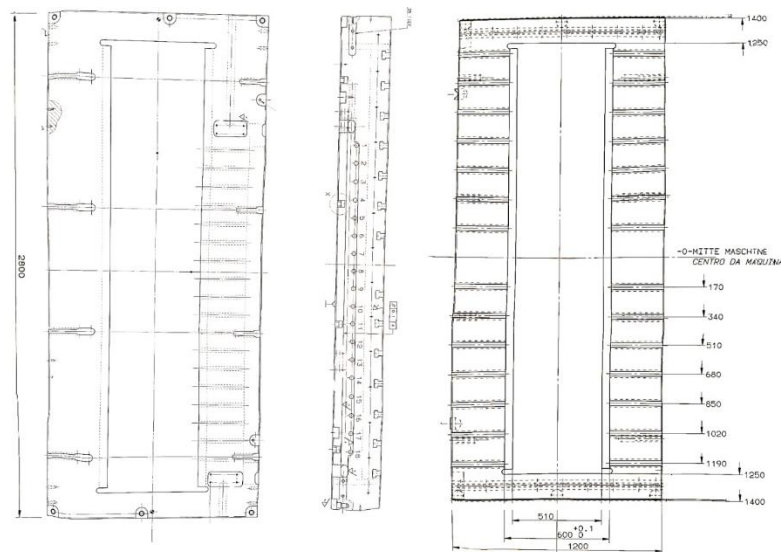
Fonte: Autor (2023).

3.2 SOBRE-MESA DA PRENSA DE ESTAMPAGEM

A sobre-mesa da prensa de estampagem, também conhecida como mesa móvel, desempenha um papel essencial no funcionamento das prensas, fornecendo suporte estrutural tanto para a ferramenta de corte quanto para a peça a ser conformada. Sua função primordial é suportar a força de prensagem aplicada pelo martelo, garantindo a planicidade da estrutura para assegurar a conformidade com tolerâncias dimensionais e a qualidade da superfície das peças produzidas. Além disso, por ser móvel, possibilita a troca rápida de ferramentas, reduzindo significativamente o tempo ocioso do equipamento (Neto, 2022).

A geometria da sobre-mesa das prensas rápidas de estampagem progressiva da Schuler pode ser vista na Figura 13. É possível notar que se trata de uma peça robusta, de 2,8 x 1,2 m. Destaca-se na geometria a presença de diversos rasgos em T, onde as ferramentas de corte são fixadas, e uma grande abertura em seu interior, denominada fosso, por onde é realizado o corte da chapa metálica, juntamente com os estampos.

Figura 13 - Desenho da sobre-mesa das prensas rápidas Schuler.



Fonte: Schuler (2012).

A resistência do material da sobre-mesa deve ser suficiente para suportar as forças de estampagem sem que deformações excessivas ocorram nesse componente. Isso requer uma análise cuidadosa da seleção de materiais e do projeto estrutural. À medida que o processo de estampagem é repetido ao longo do tempo, a sobre-mesa da prensa está sujeita à degradação gradual. As áreas de contato com as ferramentas podem sofrer danos por deformação e/ou desgaste, o que pode resultar em perda de precisão e eficiência no processo, além de aumentar a possibilidade de quebras e desgaste prematuro de ferramentas. Portanto, a manutenção adequada é essencial para garantir sua longevidade e desempenho contínuo. As organizações devem adotar a responsabilidade pela manutenção como a prática destinada a garantir a disponibilidade eficiente de seus equipamentos. Ao fazer isso, evitam impactos negativos em seus processos de produção, na segurança dos envolvidos e na preservação do meio ambiente (Barros, 2018 apud Dos Santos, 2019).

3.3 AÇOS UTILIZADOS EM SOBRES-MESAS DE PRENSAS

3.3.1 Aços PX Series

Os aços da Série PX são aços ferramenta de trabalho a frio amplamente utilizados para a moldagem de polímeros. De modo geral, tratam-se de aços baixa

liga, de baixo a médio carbono. Possuem como vantagem o fato de possuírem uma boa usinabilidade, serem facilmente tratáveis termicamente, em que tratamentos térmicos convencionais realizados em outros aços baixa liga ou comuns ao carbono podem ser aplicados nos aços dessa série. Além disso, ligas de baixo a médio teor de carbono podem ser cementadas e ligas de mais alto teor de carbono podem ser nitretadas. Também é possível realizar processos de nitrocarburação combinando esses dois processos para melhorar a dureza e resistência da superfície (Chandler, 2010; ANSYS, 2023). A composição de um aço comum dessa categoria, o aço AISI P20, pode ser vista na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição típica do aço AISI P20.

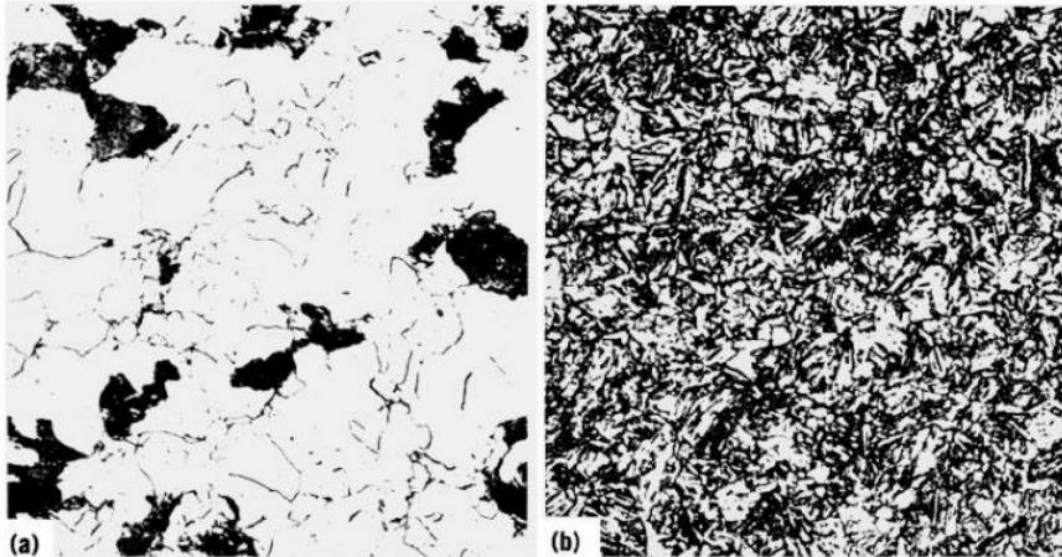
% C	% Mn	% Si	% Cr	% Mo
0,28 - 0,40	0,60 - 1,00	0,20 - 0,80	1,40 - 2,00	0,30 - 0,55

Fonte: Chandler (2010).

Quanto às propriedades do aço AISI P20, é comumente utilizado nas condições de têmpera e revenimento, alcançando uma faixa de dureza entre 38 e 54 HRC. Quando submetido ao processo de cementação, atinge sua máxima resistência ao desgaste e dureza, podendo chegar a 66 HRC. Além disso, é passível de nitretação, resultando em uma dureza de até 62 HRC. Em situações de recozimento, o aço apresenta uma faixa de dureza entre 149 e 212 HB. Normalmente disponibilizado no mercado pré-endurecido, com uma dureza aproximada de 300 HB. (Chandler, 2010).

Em relação à sua microestrutura, no estado recozido é comum a presença de grãos de ferrita com algumas colônias de perlita, como é possível observar na Figura 14 (a). Já no estado temperado, como mostra o item (b), pode-se observar a presença de uma microestrutura martensítica na amostra. Neste caso, foi realizada dupla têmpera com resfriamento em água. Para a aquisição das imagens foi utilizado como exemplo o aço P21, em ambos os casos foi realizado ataque com nital 4% e ampliação de 500x.

Figura 14 - Microestruturas típicas dos aços da Serie P. Estado recozido (a), com presença de ferrita (branco) e perlita (preto) e estado duplamente temperado (b) com a presença de martensita em toda a estrutura.



Fonte: Chandler (2010).

3.3.2 AISI 4140

O aço AISI 4140 é um dos aços liga com médio carbono mais amplamente utilizados na indústria. É relativamente barato considerando sua grande capacidade de endurecimento (Chandler, 2010). Sua composição típica pode ser visualizada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição Típica do aço AISI 4140.

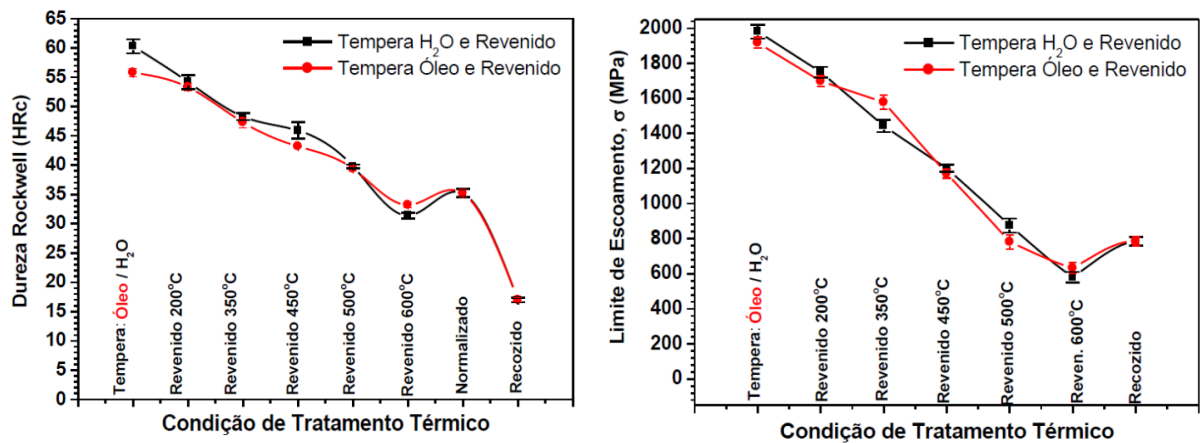
% C	% Mn	% P	% S	% Si	% Cr	% Mo
0,38 - 0,43	0,75 - 1,00	0,035 max	0,040 max	0,15 - 0,30	0,80 - 1,10	0,15 - 0,25

Fonte: Chandler (2010).

Quando normalizados podem apresentar elevada tenacidade e seu limite de escoamento pode alcançar valores próximos de 1000 Mpa, tendo um núcleo adequado para a aplicação em que elevada resistência mecânica, dureza e resistência ao impacto são requeridas. Além disso, caso seja necessário contornar problemas relacionado à desgaste abrasivo e arrancamento, é possível nitretar a superfície do aço AISI 4140 até uma dureza de 59 HRC, ou 613 HB, apesar do fato de que esse material sem a nitretação já possui uma dureza considerável quando

normalizado, de cerca de 35 HRC, ou 322 HB. Caso maiores durezas sejam requeridas, o aço AISI 4140 ainda apresenta excelentes propriedades quando se encontra no estado temperado e revenido (Chandler, 2010; Rios et al, 2016). Na Figura 15 é possível observar o perfil de dureza (à esquerda) e de limite de escoamento compressivo (à direita) deste aço com diferentes tratamentos térmicos.

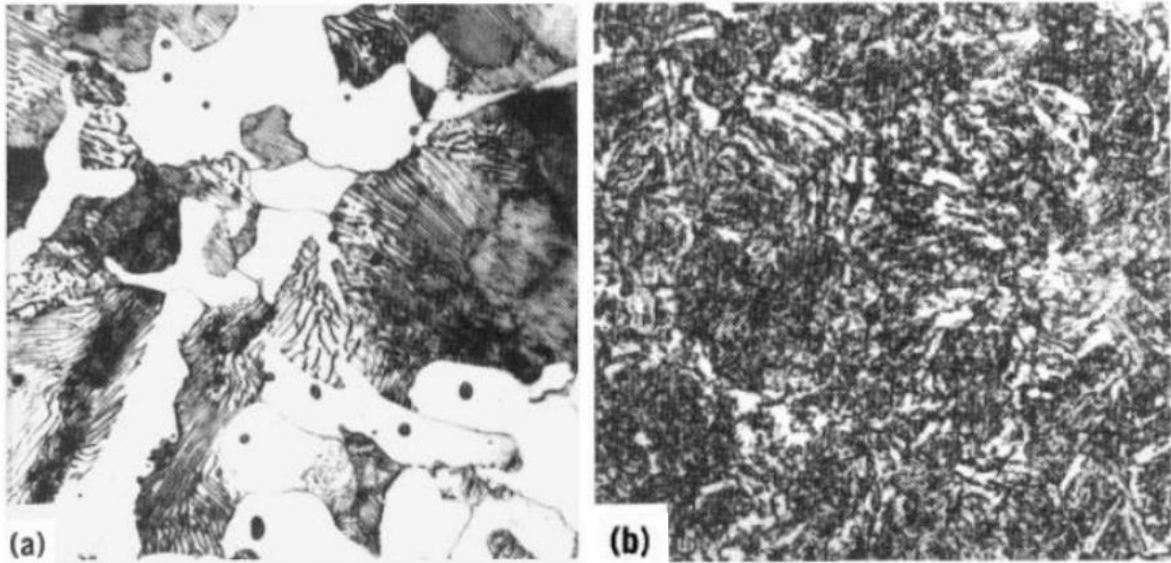
Figura 15 - Perfil de variação de dureza HRC (esquerda) e limite de escoamento compressivo (direita) do aço AISI 4140 com base no tratamento térmico realizado.



Fonte: Rios et al (2016).

Em relação à sua microestrutura, na condição de normalizado o aço AISI 4140 é composto por ferrita e perlita fina lamelar, como é possível visualizar na Figura 16 (a). A amostra foi austenitizada à 900°C por meia hora e resfriada ao ar, o ataque químico foi realizado com 2% de nital e a imagem possui ampliação de 825x. Já no estado temperado e revenido apresenta agregados de martensita, ferrita e cementita, como é possível observar na Figura 16 (b). A amostra foi temperada à óleo, o ataque químico foi realizado com 2% de nital e a imagem possui ampliação de 750x (Chandler, 2010).

Figura 16 - Microestrutura do AISI 4140 normalizado (a) e temperado/revenido (b).



Fonte: Chandler (2010).

3.4 POSSÍVEIS CAUSAS DAS VARIAÇÕES DIMENSIONAIS

3.4.1 Tensão Concentrada

Cargas provocam deformações em todos os corpos materiais, e, como resultado, os pontos no corpo sofrerão deslocamentos e mudanças em suas posições. Conceitualmente, a deformação é uma quantidade geométrica medida por técnicas experimentais e, uma vez obtida, é possível relacionar com o estado de tensões no corpo, por meio das propriedades específicas do material. As consequências, de aspecto prático, incluem redução da resistência estrutural, distorção geométrica e flambagem, tendo implicações diretas na integridade de componentes e estruturas (Hibbeler, 2010; Callister, 2012).

Tensões concentradas podem originar-se de imperfeições não inerentes ao elemento, como marcas de ferramenta, furos, entalhes, sulcos ou roscas. O estado de tensões nominal é considerado presente quando o elemento não está sujeito a elementos que amplificam a tensão (Budynas & Nisbett, 2006).

Os mecanismos de deformação localizada variam conforme o material e as condições de carga, sendo comum a ocorrência de deformações locais por fadiga. A fadiga é um processo de dano localizado em um componente resultante de carregamento cíclico. Durante o ciclo, pode haver deformação plástica concentrada

nas áreas de maior tensão, causando danos permanentes e eventual desenvolvimento de uma trinca. Com o aumento dos ciclos de carga, o comprimento da trinca aumenta, levando eventualmente à falha do componente após um determinado número de ciclos (Lee et al., 2005).

3.4.2 Fretting

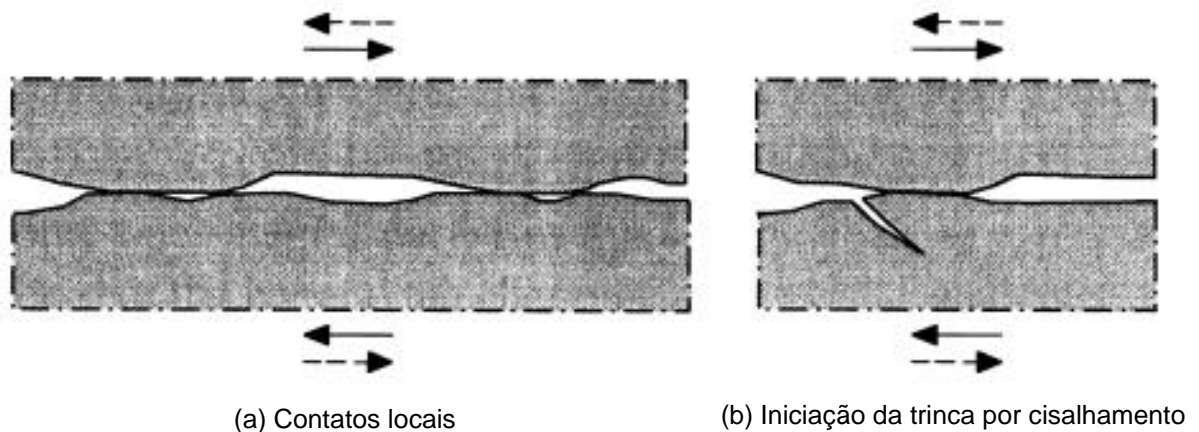
Existem diversos mecanismos de desgaste, que podem ser classificados em tipos distintos. Adesão, abrasão, delaminação, erosão, *fretting*, fadiga e corrosão/oxidação são alguns exemplos desses processos. O desgaste adesivo ocorre pela transferência de material de uma superfície para outra, muitas vezes resultando no arrancamento de junções sólidas previamente soldadas à superfície afetada. Por sua vez, o desgaste abrasivo é provocado pelo deslizamento de partículas duras ou protuberâncias sobre uma superfície sólida mais macia. Já o desgaste por delaminação surge da separação de finas camadas de material abaixo da interface da superfície de contato. No caso do desgaste por erosão, ele é originado pela interação mecânica entre uma superfície sólida e um fluido. O desgaste por corrosão/oxidação, por sua vez, manifesta-se quando o deslizamento ocorre em um ambiente corrosivo ou oxidativo. O desgaste por fadiga ocorre devido ao crescimento de uma fratura induzida por fadiga superficial. Por fim, O *fretting* é causado pela pequena amplitude de movimento tangencial oscilatório entre duas superfícies (Ingole et al., 2013 apud Corrêa, 2018).

De maneira mais detalhada, o fenômeno de *fretting* é um processo especial de desgaste que ocorre na área de contato entre dois materiais sob a ação de uma carga, quando há uma leve movimentação relativa entre eles, por vibração ou alguma outra força de natureza oscilatória. Ele pode causar desgaste localizado ou iniciar trincas por fadiga, o que pode diminuir drasticamente a resistência à fadiga de alguns materiais (Hurricks, 1970). O dano inicia com a adesão local entre superfícies em contato e progride quando partículas aderidas são removidas da superfície, por arrancamento. Quando essas partículas são removidas, elas podem interagir com ar ou outros ambientes corrosivos, resultando um pó fino de aspecto avermelhado nessa área, composto por óxido de ferro. As superfícies afetadas apresentam pites em sua superfície com produtos de corrosão ao seu redor. Esse fenômeno é importante a ser

considerado pois sob condições de *fretting*, a resistência à fadiga é reduzida de 50 a 70% (ASM, 1996).

Sob a ação de uma carga cíclica, como é o caso da sobre-mesa de prensa, que está em contato direto com a ferramenta de estampagem, pode ocorrer o *fretting*. Dessa maneira, esse aspecto deve ser considerado na avaliação para definir a verdadeira causa dos danos encontrados. Nessa hipótese, a superfície da ferramenta em contato com a superfície da sobre-mesa de estampagem em movimento relativo, começa a gerar microtrincas na região superficial, que são seguidas do arrancamento de pequenas partículas de natureza metálica (Schijve, 2009). A Figura 17 mostra uma representação esquemática deste fenômeno.

Figura 17 - Representação esquemática do fenômeno de *fretting*



Fonte: Schijve (2009).

3.4.3 Dimensões e Tolerâncias

Dimensões e tolerâncias desempenham um papel fundamental na engenharia de projetos mecânicos, assegurando a funcionalidade, intercambialidade e confiabilidade de componentes e sistemas. Para compreender melhor esse campo, alguns termos são essenciais. O “tamanho normal” refere-se à dimensão teórica utilizada no projeto, estabelecendo-se como a referência para um componente. “Limites” abrangem as dimensões máximas e mínimas permitidas, com base no tamanho normal. As “tolerâncias”, por sua vez, representam a diferença entre esses limites, podendo ser unilaterais ou bilaterais. A tolerância unilateral permite variação

em apenas um sentido, negativo ou positivo, enquanto a bilateral permite que uma dimensão seja maior ou menor que o tamanho normal (Budynas & Nisbett, 2006).

Além disso, os conceitos de folga e interferência são essenciais. A “folga” ocorre na montagem de dois componentes, onde não há interação direta, mantendo-se um espaço vazio. Em contrapartida, a interferência implica contato entre componentes. Em projetos, frequentemente são especificadas medidas mínimas de folga ou máximas de interferência permitidas. Dentro desse contexto, dimensões e tolerâncias adequadas exercem influência direta na vida útil, eficiência e durabilidade dos produtos, reduzindo o desgaste e prevenindo falhas prematuras. Respeitar folgas e interferências é essencial para garantir o desempenho e integridade dos sistemas mecânicos (Budynas & Nisbett, 2006).

A necessidade de economia e simplificação, exige projetos com tolerâncias completas, que se adequem à função, à fabricação e à inspeção. Isto significa que todas as características geométricas da peça, como forma, tamanho, orientação e posição, devem ser claramente definidas. Nada deve depender do julgamento individual do fabricante ou inspetor. Somente seguindo essa abordagem é possível garantir o funcionamento adequado e aproveitar ao máximo as oportunidades de economia e simplificação na fabricação, inspeção e desempenho (Henzold, 2006).

3.5 POSSÍVEIS CONTRAMEDIDAS

3.5.1 Seleção de Materiais

A seleção adequada de materiais é a decisão final, prática, no processo de projeto da engenharia, e pode determinar o sucesso ou o fracasso do projeto. Além disso, é de suma importância que o material selecionado seja economicamente viável e disponível no mercado. Nesse contexto, caso o material se prove inadequado para a aplicação, uma das soluções é a substituição por outro mais adequado (Shackelford, 2012).

Para tal seleção, alguns parâmetros devem ser considerados, principalmente em relação a microestrutura, propriedades e aplicação (Callister, 2012). Tratando-se da aplicação de uma sobre-mesa de prensa de estampagem, certas propriedades são requeridas, de acordo com o próprio processo produtivo da máquina. Dentre as propriedades requeridas para essa aplicação é possível citar a dureza, resistência

mecânica, resistência ao impacto e resistência à fadiga, a fim de evitar o desgaste ou falha prematura da peça em questão.

3.5.2 Têmpera e Revenimento

Processos de tratamentos térmicos, como a têmpera e o revenido podem modificar consideravelmente as propriedades mecânicas dos aços. Conceitualmente, a têmpera e o revenimento são operações de tratamento térmico aplicadas em ligas ferrosas que têm como objetivo fazer com que o material adquira dureza e resistência mecânica compatíveis com as condições de sua aplicação (Chiaverini, 2008).

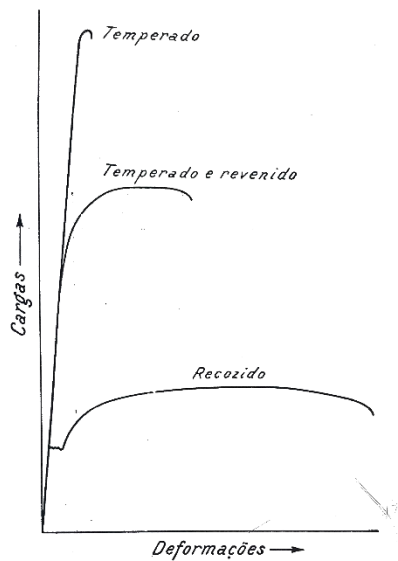
Uma das características mais importantes dos aços como materiais em equipamentos mecânicos é a possibilidade de desenvolver combinações ótimas de resistência e tenacidade, medida pela resistência ao impacto. A microestrutura que permite essa combinação é a martensita revenida, obtida pelos processos de têmpera e revenimento (Silva & Mel, 1988).

A operação de têmpera visa a obtenção do constituinte “martensita” e consiste no resfriamento rápido a partir da temperatura de austenitização do aço, em um meio de grande capacidade de resfriamento, como água, salmoura, óleo ou ar. A velocidade de resfriamento deve ser tal que evite a transformação da austenita nos microconstituintes normais, formados pelo resfriamento lento. Porém, vale destacar que no estado puramente temperado, a martensita é muito dura e frágil e, portanto, não pode ser empregada na maioria das aplicações, pois quaisquer tensões internas que possam ter sido introduzidas durante a têmpera têm o efeito de reduzir a resistência do material. Nesse contexto, para reduzir os efeitos negativos da têmpera existe o processo de revenimento (Chiaverini, 2008; Callister, 2012).

O revenimento consiste no aquecimento de um aço martensítico até uma temperatura abaixo da temperatura eutetóide durante um determinado período de tempo. Esse processo tem a capacidade de corrigir as propriedades prejudicadas pela têmpera, tais como a resistência ao choque, o alongamento e a estricção, além de reduzir consideravelmente as tensões internas do material (Callister, 2012; Colpaert, 1974). A Figura 18 mostra de maneira esquemática e comparativa a diferença no comportamento do diagrama Tensão x Deformação de um material temperado, temperado/revenido e recozido. Pode-se observar que com a têmpera pura, o material fica com elevada resistência mecânica, entretanto apresenta comportamento

demasiadamente frágil, sendo inadequado para a maioria das situações. Já o material recozido, apresenta elevada ductilidade, sendo facilmente trabalhável, entretanto com baixa resistência mecânica e dureza. Com o processo de têmpera e revenimento, por sua vez, é possível conseguir apreciável resistência mecânica, ainda mantendo certa tenacidade no material, sendo dessa maneira, adequado para boa parte das aplicações (Colpaert, 1974).

Figura 18 – Diagrama Tensão x Deformação esquemático do comportamento de materiais recozidos, temperados e temperados e revenidos.



Fonte: Colpaert (1974).

Nesse contexto entra a importância desses tratamentos para a aplicação de uma sobre-mesa de prensa de estampagem. Enquanto a peça precisa ter uma boa dureza e resistência mecânica, ela ainda precisa de tenacidade para resistir aos ciclos de impactos promovidos pelo processo de estampagem. Essas propriedades são alcançadas por meio da têmpera e revenimento (Silva & Mel, 1988).

3.5.3 Normalização

Outra opção a ser considerada é a normalização de aços de elevada resistência mecânica, como é o caso do AISI 4140. O processo de tratamento térmico de normalização tem como objetivo refinar e homogeneizar a estrutura, fazendo com que o material adquira melhores propriedades quando comparado a um aço recozido.

O resfriamento do aço, neste tratamento, após a austenitização é realizado ao ar (Chiaverini, 2008).

Com esse tratamento, a microestrutura formada é a perlita fina, com menor espaçamento entre as lamelas de cementita, o que promove dureza e resistência mecânica mais elevadas e resistência ao impacto semelhante, em comparação à materiais recozidos (Silva & Mel, 1988). Outra vantagem desse tratamento é a melhor usinabilidade, quando comparado às peças temperadas e revenidas, o que pode ser útil para aplicação em sobre-mesas de prensas de estampagem, já que a peça fabricada precisa ser finamente plana em suas condições finais, já que um processo de têmpera pode causar certas deformações dimensionais e empenamento.

3.5.4 Cementação e Nitretação

Muitos produtos demandam características distintas em diferentes regiões. Frequentemente, essa variação se manifesta na necessidade de uma superfície resistente ao desgaste e dura, juntamente com um núcleo robusto e à prova de fraturas (Black & Kohser, 2008). Dentre os tratamentos superficiais mais comuns nesse contexto estão a cementação e a nitretação.

O método de cementação é amplamente empregado na produção de peças que requerem uma superfície muito resistente ao desgaste e com alta dureza, como pinhões, engrenagens, eixos, entre outros. No entanto, devido às particularidades desse processo, como a utilização de temperaturas acima de 900°C, resfriamento rápido e mudança de fases, ele geralmente resulta em consideráveis deformações no componente (Colpaert, 1974; Leitão et al., 2012).

Este procedimento consiste em um tratamento termoquímico projetado para introduzir carbono na superfície de um material metálico, com ênfase em aços de baixa temperabilidade. Os aços mais indicados para esse propósito possuem teor médio de carbono igual ou inferior a 0,25%, com o objetivo de gerar austenita, que é subsequentemente convertida em martensita por meio do processo de têmpera e revenimento. Esse método promove o aumento da dureza e resistência ao desgaste superficial, enquanto o núcleo do material permanece tenaz. Adicionalmente, é possível obter uma camada superficial cementada formada por carbonetos de ferro durante a cementação. Esta combinação de propriedades é particularmente vantajosa para equipamentos de estampagem. Em geral, a alta dureza está associada à

fragilidade, no entanto, como a dureza relevante é apenas na superfície, é suficiente que a peça apresente essa qualidade em sua região periférica, mantendo a tenacidade no núcleo (Callister, 2012; Celestino et al., 2007; Chandler, 2010; Colpaert, 1974; Dossett & Totten, 2013).

Outro tratamento termoquímico que pode ser realizado para prolongar a vida útil da peça em questão é a nitretação. A nitretação, assim como outros tratamentos superficiais, por aumentar a resistência ao desgaste, pode promover a redução de problemas associados ao *fretting*, assim como reduz a propagação de microtrincas, caso houverem (Schijve, 2009).

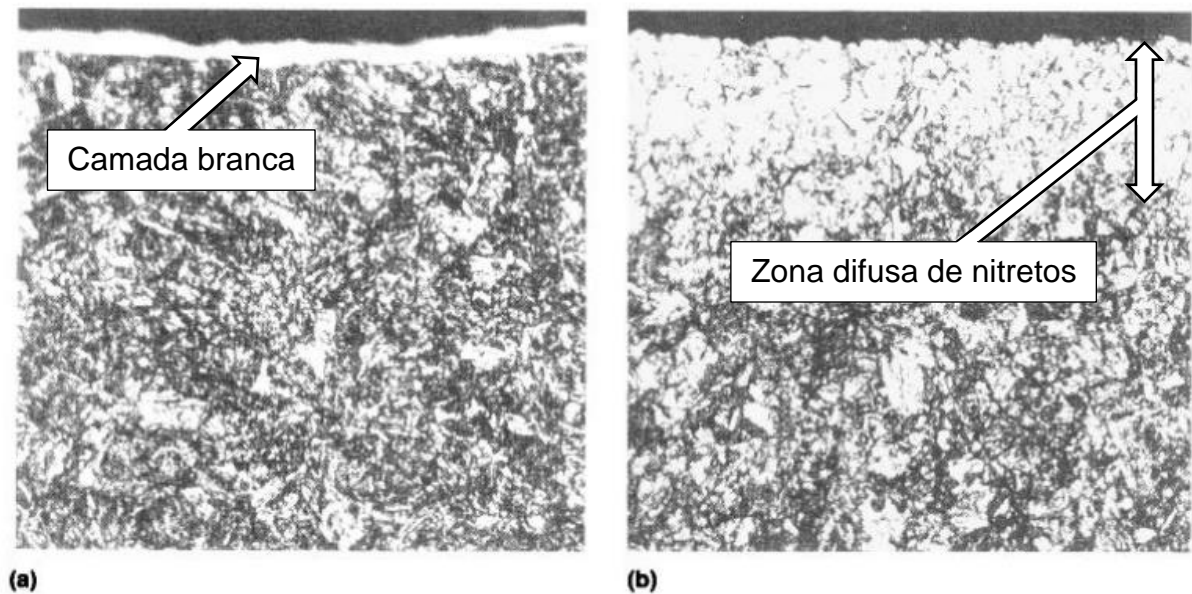
Este método consiste na introdução de nitrogênio na superfície de uma liga ferrosa sólida, mantendo o material em uma temperatura adequada em uma atmosfera rica com o elemento em questão. O processo também pode ser realizado por plasma, à vácuo, resultando em menores variações dimensionais decorrentes do tratamento. O conceito de "plasma" refere-se a um gás que contém espécies neutras e carregadas eletricamente, como elétrons, íons positivos, íons negativos, átomos e moléculas (Dossett & Totten, 2013; Rosnagel et al., 1990).

As peças a serem tratadas são colocadas em uma câmara à vácuo, e um potencial de corrente contínua de 500 a 1000 volts é aplicado entre as peças e as paredes do forno. Gás nitrogênio de baixa pressão é introduzido na câmara e é ionizado. Os íons são acelerados em direção à superfície da peça, que está carregada negativamente, impactando e gerando calor suficiente para promover a difusão para o interior. Este é o único calor associado ao processo e a câmara atua apenas como um recipiente a vácuo e eletrodo. As vantagens do processo incluem tempos de ciclo mais curtos, menor consumo de gases, custos de energia significativamente reduzidos e requisitos de espaço menores. A qualidade do produto é aprimorada em comparação com a nitretação convencional, e o processo é aplicável a uma gama mais ampla de materiais (Black & Kohser, 2008).

Vale destacar que podem ser realizados processos de nitretação com e sem a formação de uma "camada branca" na superfície do material. A Figura 19 mostra uma micrografia do aço AISI 4140 nas condições de têmpera com revenimento após passar por um processo de nitretação com camada branca (a) e com zona difusa de nitretos (b). Ambas as imagens foram obtidas com ataque químico de nital 2% e ampliação de 400x. Essa camada branca, formada por nitretos de ferro, possui elevada dureza, entretanto também está associada a grande fragilidade. Com o intuito

de reduzir essa fragilidade, busca-se a formação de uma zona com nitretos difusos na matriz metálica do material (Chandler, 2010).

Figura 19 - Microestrutura do aço AISI 4140 temperado e revenido e nitretado com camada branca (a) e com zona difusa de nitretos (b).



Fonte: Chandler, adaptado (2010).

3.6 SIMULAÇÃO DE ESFORÇOS

3.6.1 Análise de Elementos Finitos

Existem várias técnicas numéricas comumente utilizadas em aplicações de engenharia que se beneficiam consideravelmente do uso de soluções computadorizadas. No design mecânico, onde os *softwares* de design assistido por computador (CAD) são extensivamente utilizados, um método de análise que se integra bem com ele é a análise de elementos finitos (FEA). A teoria matemática e as aplicações desse método são extensas. Além disso, existem diversos *softwares* de FEA disponíveis, como o ANSYS, por exemplo (Budynas & Nisbett, 2006).

Este método baseia-se na subdivisão de uma estrutura em elementos menores, nos quais as equações diferenciais que descrevem o comportamento físico são aproximadas para facilitar a análise numérica. Análises de problemas tridimensionais consistem na totalidade dos problemas práticos que podem ser

avaliados pela FEA. A forma poligonal mais simples que permite a aproximação do domínio tridimensional é o tetraedro (Zienkiewicz & Taylor, 2000).

A abordagem da análise de elementos finitos divide uma estrutura em pequenos elementos para facilitar a análise. Esses elementos são conectados por nós, formando uma malha que representa a geometria da estrutura. A aplicação prática do método é vasta, abrangendo desde a análise de tensões e deformações até problemas térmicos e dinâmicos, incluindo o comportamento de estruturas sob diferentes condições de carga, distribuição de calor, transferência de massa, entre outros. A aplicação desse método demanda um entendimento da teoria dos elementos finitos, incluindo a escolha apropriada de elementos, a definição precisa das condições de contorno e a interpretação dos resultados obtidos (Moaveni, 1999; Zienkiewicz & Taylor, 2000).

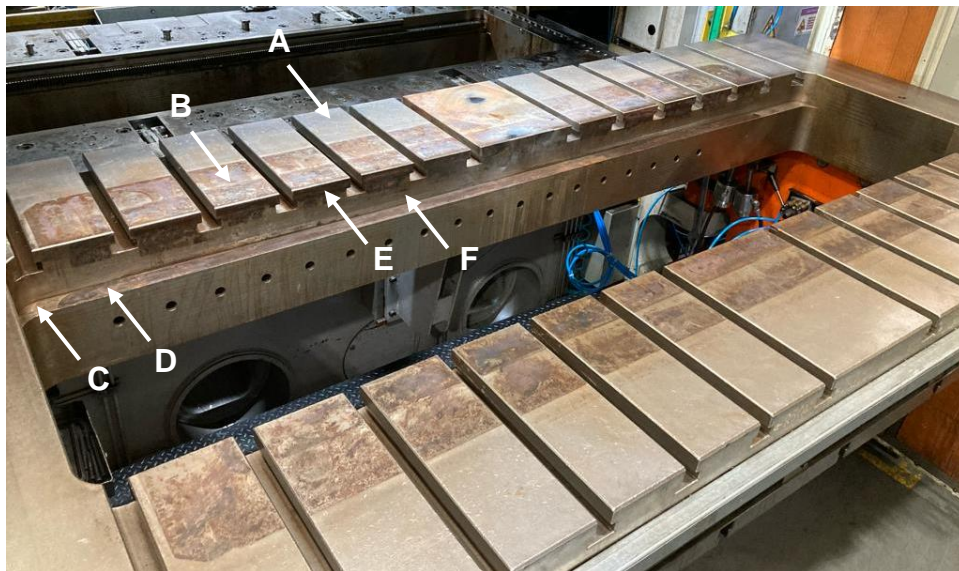
Dentre os critérios mais utilizados para análises de tensão e deformação estão o critério de von Mises, que postula que a deformação plástica ocorrerá quando o valor do esforço cisalhante médio quadrático atinge um valor crítico (Hosford e Caddell, 2018) e o método de deformação total, que considera que o estado total de deformações é definido por três componentes de deslocamento, na direção das três coordenadas, x , y e z . Dessa maneira, em sistemas tridimensionais, a deformação total é representada pela variação linear definida pelos quatro valores nodais do tetraedro (Zienkiewicz & Taylor, 2000).

4 METODOLOGIA

A metodologia para a caracterização dos danos na sobre-mesa de estampagem envolveu uma série de etapas e técnicas de análise para avaliar diferentes aspectos do material e do comportamento da peça, investigando do ponto de vista mecânico, dimensional e materialístico.

Para facilitar a compreensão das medidas realizadas, diferentes regiões da mesa foram denominadas de acordo com a Figura 20. A região “A” consiste na área superior da peça onde não são identificados danos; a região “B” consiste na área superior da peça na zona com danos. A região “C” consiste na área do rebaixo não afetada pelos danos; a região “D” consiste na região com danos no rebaixo; A região “E” consiste na área lateral próxima à superfície da região com danos; a região “F” consiste na área lateral mais afastada da superfície superior.

Figura 20 - Diferentes regiões da sobremesa. Superior sem problemas "A"; superior afetada "B"; rebaixo sem problemas "C"; rebaixo afetada "D"; lateral próxima da superfície afetada "E"; lateral longe da superfície "F"



Fonte: Autor (2023).

Além das medidas realizadas na sobre-mesa, foram coletados alguns dados da mesa da prensa, que é posicionada logo abaixo da sobre-mesa, e em uma ferramenta de estampagem. A mesa, que pode ser vista na Figura 21 (a), também apresenta danos, como mostra o item (b), e é fabricada no mesmo material da sobre-mesa. Segundo registros internos da empresa, desde a aquisição do equipamento, em 2012,

nunca foram realizadas usinagens corretivas neste componente, entretanto na sobre-mesa já foram realizadas correções.

Figura 21 - Mesa da prensa (a) e variações dimensionais na mesa (b)



Fonte: Autor (2023).

A ferramenta de estampagem é mostrada na Figura 22. Nela estão indicadas a posição da régua do calço, parte que fica em contato com o rebaixo da sobremesa, e o berço, parte que é localizada sobre a região superior da sobre-mesa. Segundo os projetos de ferramentas de estampagem, realizados no Setor de Ferramentaria da empresa, o berço deve apresentar uma folga de 0,05 mm em relação à superfície superior da sobre-mesa, entretanto, devido aos danos identificados, isso não ocorre na prática, havendo contato indevido entre o berço e a sobre-mesa.

Figura 22 - Ferramenta de estampagem. Posição do berço e da régua do calço.



Fonte: Autor (2023).

Vale destacar que as réguas do calço são fabricadas em aço 1020 ou 1045 laminado, materiais de baixa dureza que são projetados para servir como material de sacrifício, sendo esse deformado/desgastado para que a sobre-mesa não sofra danos.

4.1 ANÁLISE QUÍMICA

Uma análise química foi realizada para verificar a composição do material da sobre-mesa. Para tal análise foi realizado um furo na sobre-mesa para coletar cavaco, de maneira controlada, por meio de um corte lento evitando queimar a amostra, sem fluido de corte para que não ocorra a contaminação da amostra. A amostra coletada pode ser vista na Figura 23.

Figura 23 - Amostra de material da sobre-mesa de prensa de estampagem



Fonte: Autor (2023).

Na análise química, a determinação do carbono e enxofre foi realizada por meio de um Determinador de Carbono e Enxofre LECO, modelo CS230 conforme norma interna WPS-4474. Os demais elementos foram determinados via Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES), após a amostra ser pesada e digerida, de acordo com norma interna WPS-4378, realizados pelo setor de Pesquisa & Desenvolvimento (P&D) da WEG Equipamentos Elétricos S. A.

A determinação do teor de carbono e enxofre inicia com uma amostra pré-pesada de aproximadamente 1 g que sofre combustão em um fluxo de oxigênio purificado. O carbono e o enxofre presentes na amostra são oxidados em dióxido de

carbono (CO₂) e em dióxido de enxofre (SO₂). Células infravermelhas não dispersivas, presentes no equipamento, são baseadas no princípio de que o CO₂ e o SO₂ absorvem a energia infravermelha em comprimentos de onda exclusivos. Dessa maneira, a concentração de amostras desconhecidas é determinada em relação aos padrões de calibração (Leco, 2023).

O método de ICP-OES consiste na determinação quantitativa e qualitativa dos elementos constituintes em um determinado tipo de amostra. Seu princípio geral se baseia no fato de que átomos livres, quando colocados em um ambiente energético, emitem luz em uma série de intervalos de comprimento de onda que formam um padrão característico do átomo que o produz. Além disso, as intensidades das linhas geradas geralmente são proporcionais ao número de átomos que as produzem. Dessa maneira é possível identificar tanto os elementos presentes na amostra, quanto a quantidade relativa deles. Entretanto essa técnica possui limitações em relação à alguns elementos e, portanto, são utilizadas técnicas auxiliares para a determinação deles, como é o caso do carbono e enxofre (ASM, 2019).

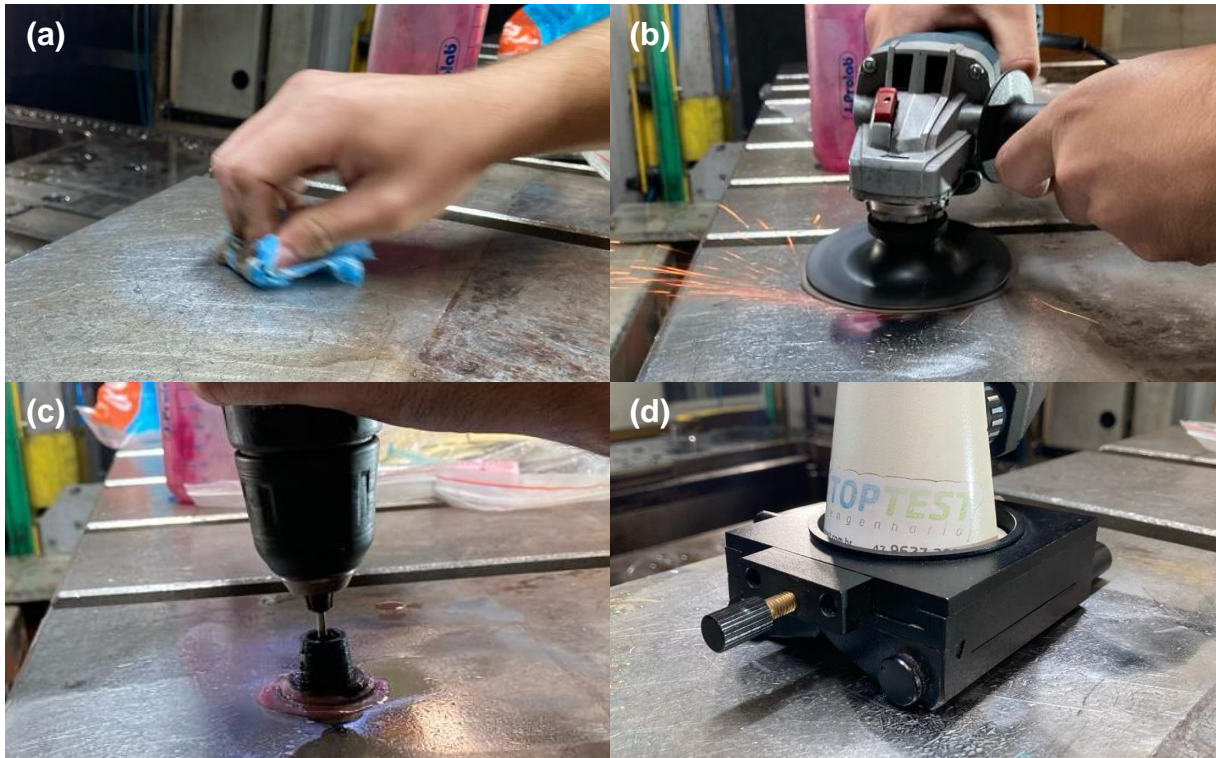
4.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL IN LOCO

Foi realizada uma análise microestrutural não destrutiva, *in loco*, do material da sobre-mesa, para identificar a microestrutura e condição de beneficiamento do aço. Isso incluiu a avaliação das fases presentes, do tamanho de grão e de qualquer anomalia na microestrutura. O ensaio consiste em uma técnica de metalografia não destrutiva, utilizada quando há a necessidade de avaliar a microestrutura de peças de grande porte ou que não podem ser cortadas e fisicamente levadas até um laboratório, como é o caso da peça em questão, sendo realizado por meio de um microscópio óptico portátil (Voort, 2007).

O ensaio em questão foi realizado pela empresa terceira Toptest, diretamente no Setor da Estamparia da WEG Equipamentos Elétricos S. A. Em primeiro lugar, foi realizada a limpeza da superfície com álcool isopropílico, e então a região da peça a ser avaliada foi lixada com lixas de granulometria #200, #400, #600, #1200 e #1500. Posteriormente, a superfície é polida com pasta diamantada e atacada quimicamente com Nital 4% durante 4s e então removido com álcool isopropílico, para que sua microestrutura seja revelada. Em seguida a área preparada foi analisada por meio de um microscópio óptico portátil marca Union, modelo MEC com certificado de

Calibração Enila-084/03, incerteza inferior 1% Padrão CERTI 0911/01 e preparação do Corpo de Prova e Método de Ensaio: ASTM E1351 com ampliações de 100 e 400x. Foram coletados dados de microestrutura das regiões “A”, “B”, “E” e “F”. A Figura 24 ilustra o processo de preparação da superfície e coleta de imagens.

Figura 24 - Etapas do ensaio metalográfico *In Loco*. (a) Limpeza da superfície; (b) Lixamento; (c) Polimento; (d) Análise com microscópio.



Fonte: Autor (2023).

Para a realização das análises em questão, foram analisados ao todo 4 pontos da peça, dois na região com danos e dois na região não afetada, sendo uma vista superior e uma lateral, com o intuito de identificar, além dos microconstituintes presentes, a forma dos grãos, tanto superiormente quanto lateralmente. Durante a metalografia também foram realizadas medidas de dureza dos pontos de coleta.

4.3 VERIFICAÇÃO DE PARTÍCULAS DECORRENTES DE DESGASTE

Para verificar a existência de partículas metálicas, características de processos de desgaste, foi coletada uma amostra de óleo diretamente da superfície de uma mesa de estampagem recém desmontada, sem limpeza prévia, na região que pode ser visualizada na Figura 25. Para a realização da verificação, foi utilizado um

ímã, que foi aproximado da amostra de óleo para averiguar se partículas ferromagnéticas estariam presentes na amostra.

Figura 25 - Região de coleta do óleo para verificação da existência de partículas ferromagnéticas.



Fonte: Autor (2023).

4.4 ANÁLISE DIMENSIONAL

Foram realizadas medições das variações dimensionais localizadas na sobre-mesa utilizando um relógio comparador, um nível eletrônico e um dispositivo de cota de profundidade o que permitiu identificar as áreas específicas onde ocorreram as variações e avaliar sua magnitude.

4.4.1 Medição de Planeza

A medição de planeza foi realizada utilizando um nível eletrônico Wyler Cód. 21370, que pode ser visualizado na Figura 26. O equipamento possui incerteza de 0,05 mm e é utilizado para verificar a planeza de uma superfície. Última calibração realizada em agosto de 2023 e medidas realizadas em outubro de 2023.

Figura 26 - Nível eletrônico Wyler Cód. 21370



Fonte: Autor (2023).

A superfície da mesa possui dimensões de 2800 x 1800 mm e foram coletados 52 pontos para análise. De acordo com a norma DIN 8651 o critério de aceitação para estas máquinas é de 0,04 mm/m. Este ensaio foi realizado pelo Setor de Metrologia da WEG Equipamentos Elétricos S. A. Essa medição foi realizada em diferentes pontos da parte superior da sobre-mesa, nas regiões “A” e “B”.

4.4.2 Medição com Relógio Comparador

Para determinar a profundidade das regiões com danos foi utilizado um relógio comparador Mitutoyo N°204065, como mostra a Figura 27. O equipamento é capaz de realizar medidas com resolução de 0,01 mm.

Figura 27 - Relógio Comparador Mitutoyo N°204065



Fonte: Autor (2023).

Para a realização da análise, o relógio foi zerado na região sem danos e foram coletados 5 pontos na região afetada, a fim de verificar a profundidade da variação

dimensional, em nível micrométrico. Análises realizadas pelo autor, com o relógio zerado na região “A” para medir a profundidade da região “B” e zerado na região “C” para medir a profundidade da região “D”.

4.4.3 Medição com Dispositivo de Cota de Profundidade

A profundidade do rebaixo na sobre-mesa foi medida através de um dispositivo de medição de cota de profundidade, que pode ser visualizado na Figura 28. O dispositivo funciona de maneira análoga à medição de profundidade através de um paquímetro, entretanto, sua estrutura consiste de uma base mais consolidada para estabilização, sendo próprio para medir a profundidade de uma determinada peça. A resolução do equipamento é a mesma de um paquímetro analógico tradicional, de 0,02 mm.

Figura 28 - Dispositivo de Medição de Cota de Profundidade.



Fonte: Autor (2023).

Para determinação da profundidade de maneira confiável, foram tomadas 5 medidas entre a região não afetada e o rebaixo da sobre-mesa e 5 medidas entre a região afetada e o rebaixo da sobre-mesa, totalizando 10 medidas. As análises foram realizadas pelo autor medindo a distância entre as regiões “A” e “C” e entre as regiões “B” e “D”.

4.5 MEDIÇÃO DE DUREZA

Medições de dureza foram realizadas utilizando um durômetro manual *Leeb's Hardness Tester TH130* da marca *Time*, que pode ser observado na Figura 29.

Figura 29 - Durômetro Manual Leeb's Hardness Tester TH130



Fonte: Autor (2023).

Para a realização da análise, foram coletados 5 pontos na região com danos e 5 pontos na região sem danos, tanto na superfície da sobre-mesa quanto na região do rebaixo, ou seja, foram coletados pontos das regiões “A”, “B”, “C” e “D”. Também foi realizada a medição de dureza, com 5 pontos em cada região da ferramenta de estampagem, sendo tomadas medidas no calço e berço. As análises foram realizadas pelo autor, totalizando 20 medidas na sobre-mesa e 10 medidas na ferramenta.

4.6 MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE

Medidas de rugosidade da superfície foram realizadas na sobre-mesa, tanto na região com danos quanto na região sem danos. Isso permitiu avaliar as diferenças na qualidade da superfície e verificar a existência de indícios de desgaste ou deformação. Para a realização da análise foi utilizado um rugosímetro SJ-210 da marca Mitutoyo, que pode ser visto na Figura 30.

Figura 30 - Rugosímetro portátil Mitutoyo SJ-210.



Fonte: Autor (2023).

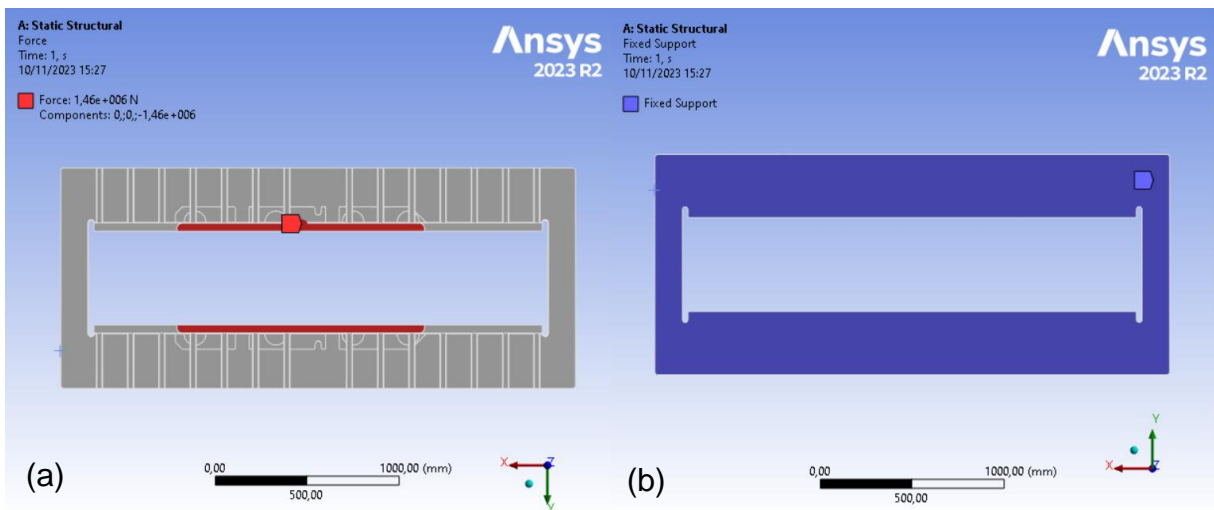
Foram realizadas 5 tomadas de dados nas regiões com e sem danos, tanto no local do rebaixo como na superfície superior da sobre-mesa, totalizando 20 tomadas de dados. Foram feitas leituras das regiões “A”, “B”, “C” e “D” e para as análises foram considerados parâmetros de rugosidade média (R_a) e pontos de máximo (R_{max})

4.7 SIMULAÇÃO DE ESFORÇOS

Utilizando o *software ANSYS 2023 R2*, foi realizada uma simulação de FEA para calcular as tensões e deformações a que a sobre-mesa está submetida durante o processo de estampagem. Isto auxiliou a verificar se as tensões aplicadas se encontram de acordo com o dimensionamento previsto para a ferramenta em questão. Para tal, foi utilizada a função Estático Estrutural do *software*.

Em relação aos parâmetros da simulação, foi utilizada com base a peça em CAD da sobre-mesa, mostrada na Figura 3. Uma força de 146 toneladas (1.460.000 N) foi aplicada nas regiões de contato entre a ferramenta e a sobre-mesa. Como pontos fixos, foi considerada toda a superfície inferior da sobre-mesa, que fica em contato com a mesa. Na Figura 31 é possível visualizar as regiões de aplicação de força destacadas em vermelho e a região de apoio em azul.

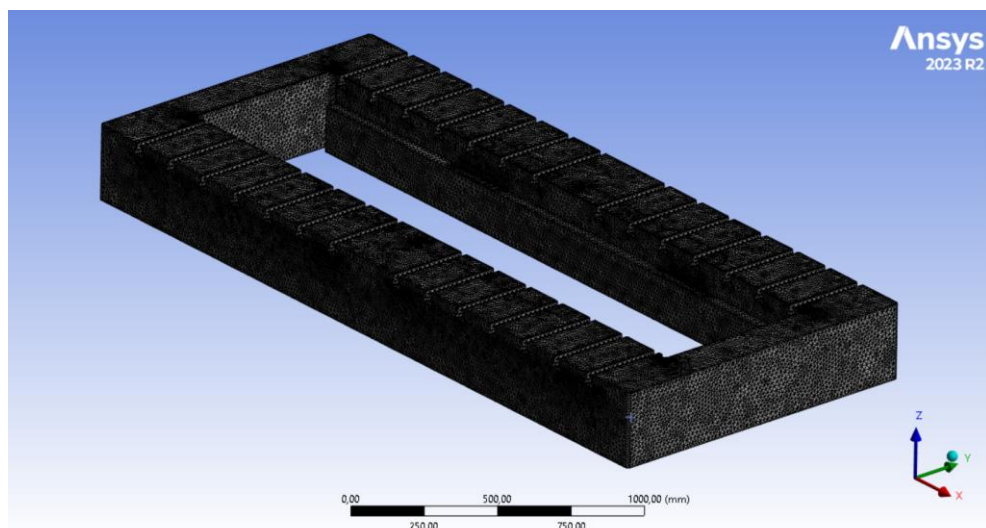
Figura 31 – Vista superior (a) área de aplicação de força (vermelho) e vista inferior (b) área de apoio (azul) utilizadas para a simulação de esforços estáticos.



Fonte: Autor (2023).

Para a malha da simulação, foi utilizado o método de geração automática do *software*, entretanto o tamanho máximo do elemento foi definido para 10 mm, a resolução para 7 e o ângulo entre as arestas do tetraedro foi determinado como “fino”. Todos os critérios de qualidade da malha definidos pelo *software* encontram-se dentro da faixa de valores permitidos. A malha utilizada pode ser visualizada na Figura 32.

Figura 32 - Malha utilizada para a simulação de esforços estáticos.



Fonte: Autor (2023).

Para a definição de materiais, a simulação foi executada utilizando os materiais DIN 1.2312 no estado recozido e AISI 4140 normalizado, com propriedades retiradas do próprio banco de dados do ANSYS (2023), entretanto, os valores de

Limite de escoamento (LE) e Limite de Resistência à Tração (LRT) do aço DIN 1.2312 foram estimados, considerando a Equação 1 e a Equação 2 (Callister, 2012) que utilizam estimativas para aços baixa liga, como é o caso do aço DIN 1.21312 e utilizando a dureza média encontrada nas medidas de dureza realizadas durante o estudo, apresentadas na Seção 5.5.

$$LRT = 3,45 * HB \quad (\text{Equação 1})$$

$$LE = 0,63 * LRT \quad (\text{Equação 2})$$

As propriedades utilizadas podem ser visualizadas na Tabela 4. Para tal foi considerada a dureza inicial da sobre-mesa na região do rebaixo, de 139 HB, por ser a menor dureza encontrada empiricamente e, portanto, fornecer o resultado mais seguro. Para a análise de resultados, foram avaliadas informações de Tensão Equivalente (Von-Mises) e de Deformação Total.

Tabela 4 - Propriedades dos aços AISI 4140 normalizado e DIN 1.2312 recozido.

Propriedade	AISI 4140 Normalizado	DIN 1.2312 Recozido
Densidade (kg/m ³)	7850	7810
Módulo de Young (GPa)	212	212
Coefficiente de Poisson	0,29	0,29
Limite de Escoamento (MPa)	652	302*
Limite de Resistência à Tração (MPa)	1015	480*

*Dados estimados com base nas Equações 1 e 2, utilizado o valor médio de dureza de 139 HB.

Fonte: Ansys (2023).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISE QUÍMICA

O material da sobre-mesa da prensa de estampagem apresentou composição química similar à liga DIN 1.2312 (40CrMnMoS8-6), diferente do aço esperado, AISI 4140. A composição química identificada bem como a composição nominal desses materiais, podem ser visualizadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados de análise química da amostra comparação com liga DIN 1.2312 e AISI 4140.

Elemento em Análise	Amostra (%)	DIN 1.2312 (%)	AISI 4140 (%)
Carbono	0,472%	0,35 - 0,45	0,38 - 0,43
Cromo	1,830%	1,80 - 2,00	0,80 - 1,10
Enxofre	0,055%	0,05 - 1,00	Máx 0,040
Fósforo	0,007%	Máx 0,03	Máx 0,035
Manganês	1,450%	1,40 - 1,60	0,75 - 1,00
Molibdênio	0,198%	0,15 - 0,25	0,15 - 0,25
Níquel	0,400%	-	-
Silício	0,347%	0,30 - 0,50	0,15 - 0,30

Fonte: Autor (2023); ANSYS (2023); Chandler (2010).

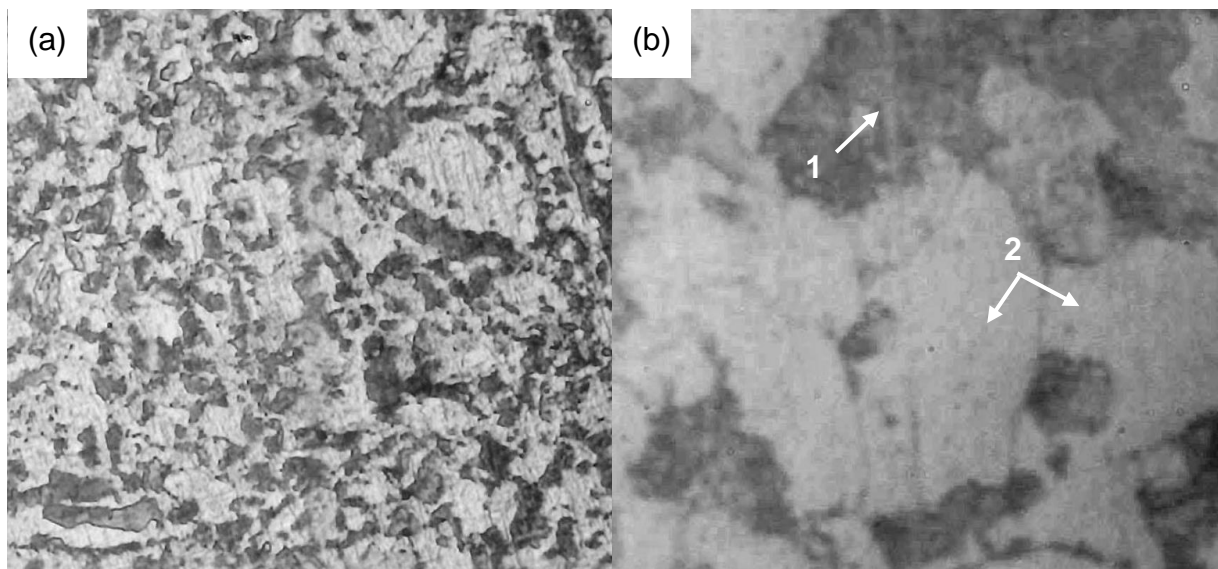
O aço liga DIN 1.2312, também conhecido como ASTM P20+S é amplamente empregado na moldagem de polímeros e pertence à categoria dos aços da série PX, que são aços ferramenta endurecíveis ao ar, sendo comparável ao aço P20+S, que basicamente consiste no aço P20 com um teor mais alto de enxofre permitido, o que facilita sua usinagem (ANSYS, 2023; Chandler, 2010; Kara, 2018).

Nas condições de têmpera e revenimento, possui Módulo de Young de 212 GPa à temperatura ambiente e dureza nominal de 32 HRC. Por possuir baixo à médio teor de carbono tem ainda a possibilidade de passar por processos de cementação, para, assim, alcançar sua máxima resistência ao desgaste. Os tratamentos térmicos e termoquímicos aplicados a esse tipo de aço seguem as práticas convencionais usadas em diversas ligas de aços comuns de carbono ou baixa liga. Com esses tratamentos é possível alcançar uma dureza de até 65 HRC na superfície do material. (Pfeiffer et al, 2023; Chandler, 2010; ANSYS, 2023).

5.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL IN LOCO

A análise microestrutural revelou que a microestrutura da mesa de prensa de estampagem consiste em uma combinação de Ferrita e Perlita recozida, como pode ser vista na Figura 33, características típicas de um aço de baixa dureza, o que não seria aconselhável para a aplicação em questão, conforme descrito na Seção 3.5.1. O item (a), que mostra um ponto na região “A”, com ampliação de 100x. O mesmo pode ser observado com mais detalhes no item (b), que mostra a mesma região com ampliação de 400x, onde é possível visualizar a presença de Perlita (1) e grãos ferríticos (2).

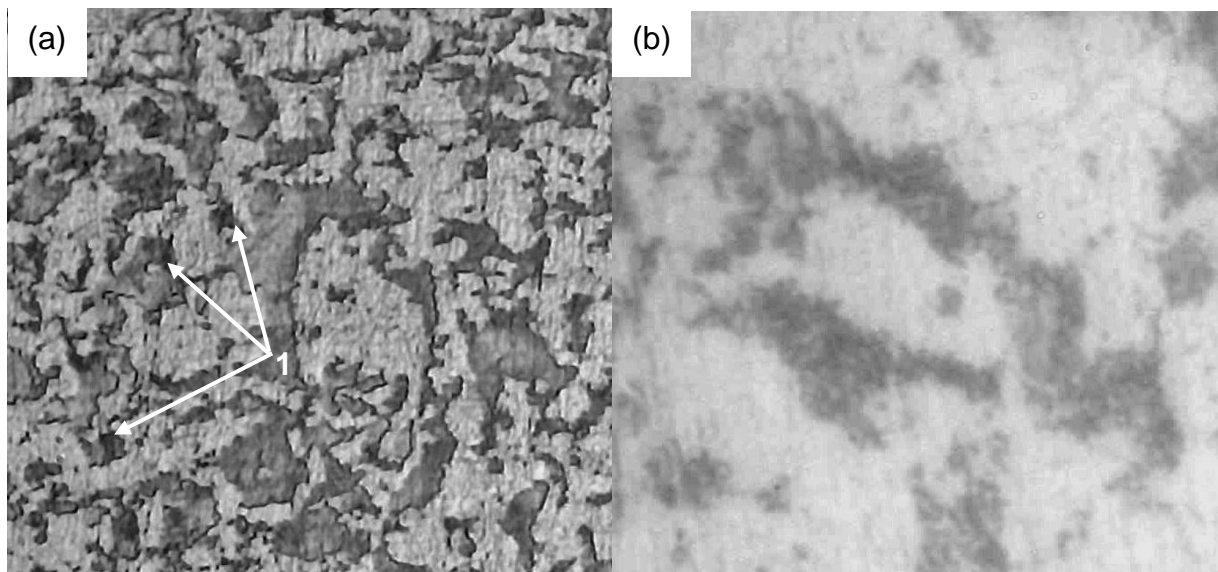
Figura 33 - Microestrutura da região “A” da sobre-mesa em aço DIN 1.2312. Ferrita e Perlita. Reagente Nital 4%, aumento 100x (a) e 400x (b).



Fonte: Autor (2023).

De maneira análoga, a Figura 34 mostra a região “B”, onde estão presentes os danos no material, com ampliação de 100x (a) e 400x (b). Percebe-se nessa região, microestrutura muito semelhante à região não afetada, com formato de grão similar, também composta por Ferrita e Perlita. Além disso, é possível identificar a existência de diversas regiões escurecidas e com aspecto de profundidade (1) que podem representar indícios de desgaste, já que diversos mecanismos de desgaste estão associados ao arrancamento de partículas, conforme descrito na Seção 3.4.2.

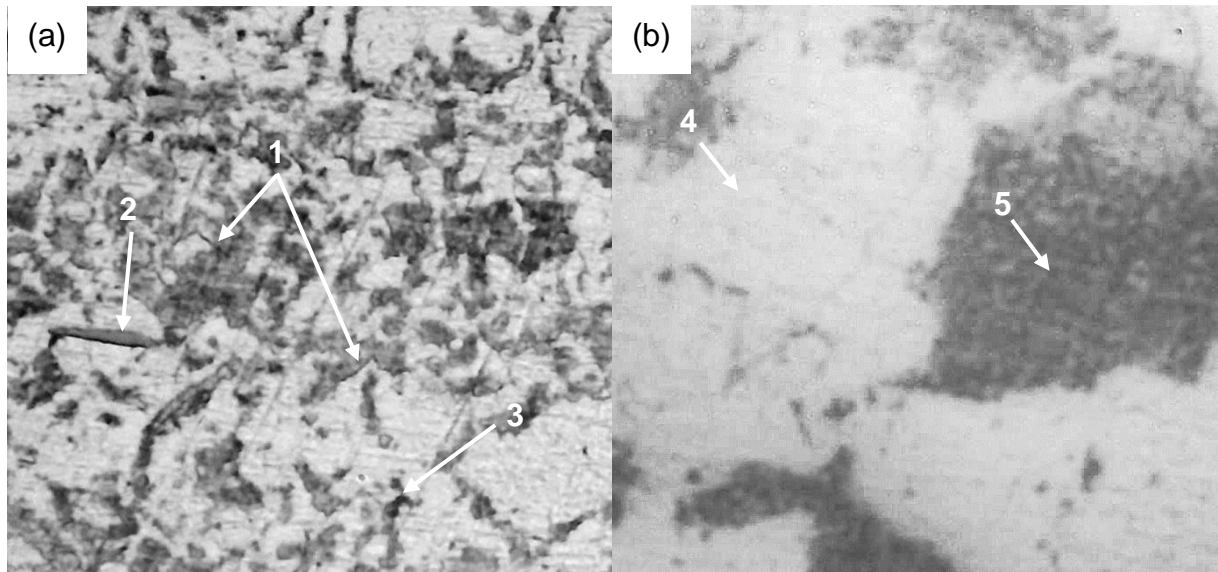
Figura 34 - Microestrutura da região “B” da sobre-mesa em aço DIN 1.2312. Ferrita e Perlita. Reagente Nital 4%, aumento 100x (a) e 400x (b).



Fonte: Autor (2023).

A Figura 35, por sua vez, mostra a região “E”, parte lateral da mesa, próximo à superfície, com ampliação de 100x (a) e 400x (b). Não são observados grãos encruados, o que pode ser um indício de que não ocorram fenômenos acentuados de deformação, no entanto, a observação dos grãos subjacentes à superfície com danos foi dificultada, devido à presença de um chanfro nessa região da peça, o que impediu uma análise mais aprofundada da estrutura do material nesse ponto específico. Como os danos são de natureza superficial, com pouca profundidade, essa análise somente seria possibilitada sem a presença do chanfro. Também pode-se observar o que seriam possíveis microtrincas relacionadas ao fenômeno de *fretting* (1), conforme mencionado na Seção 3.4.2, possivelmente sulfetos (2), decorrentes do teor de enxofre do aço P20+S, como descrito na Seção 4.1 e demais danos relacionados ao desgaste (3). No item (b), é possível identificar novamente a estrutura composta por Ferrita (4) e Perlita (5).

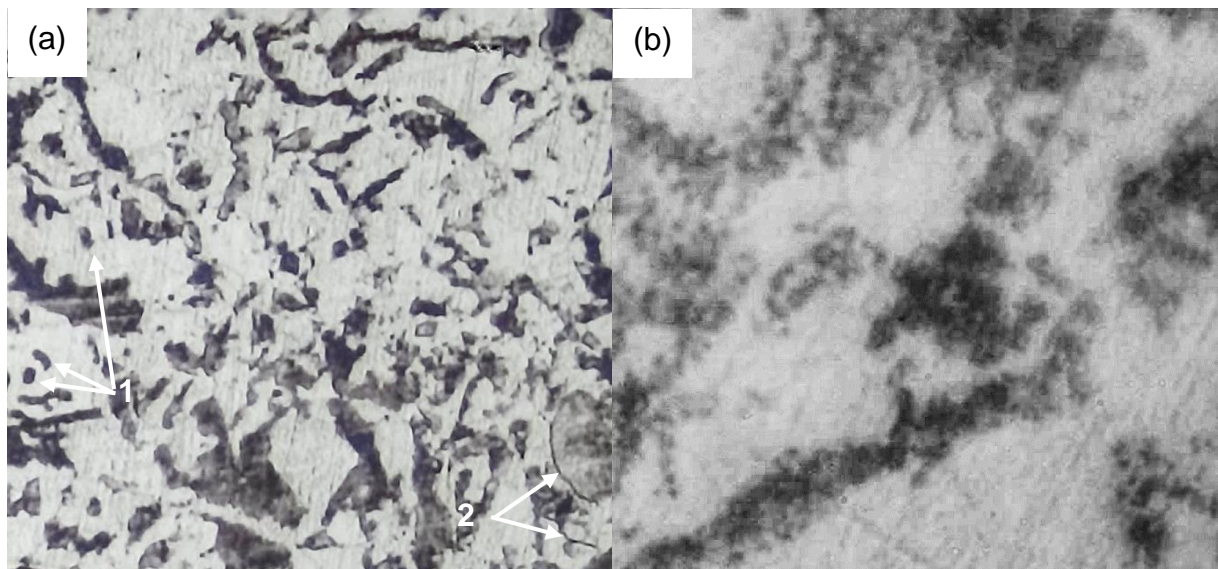
Figura 35 - Microestrutura da região “E” da sobre-mesa em aço DIN 1.2312. Ferrita e Perlita. Reagente Nital 4%, aumento 100x (a) e 400x (b).



Fonte: Autor (2023).

Por fim, a Figura 36 mostra a região “F”, lateralmente, longe da superfície afetada da sobre-mesa. É possível observar novamente a estrutura composta de Ferrita e Perlita, com aumento de 100x (a) e 400x (b). Também há indícios de danos por desgaste (1) e possíveis microtrincas causadas por *fretting* (2).

Figura 36 - Microestrutura da região “F” da sobre-mesa em aço DIN 1.2312. Ferrita e Perlita. Reagente Nital 4%, aumento 100x (a) e 400x (b).



Fonte: Autor (2023).

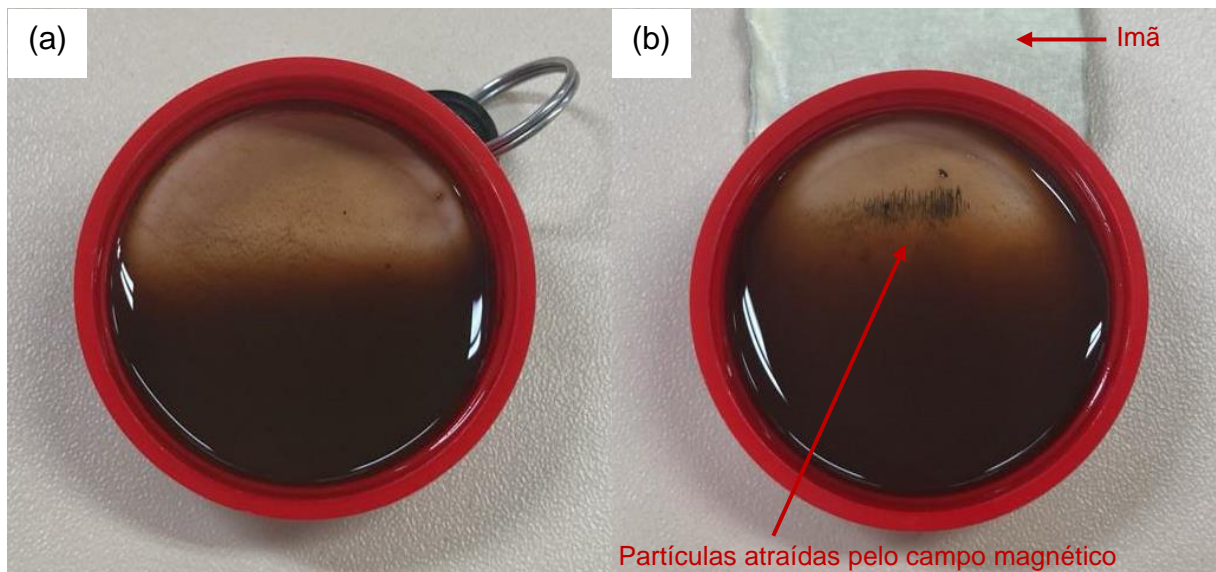
Todos os pontos apresentam microestruturas similares, típicas do tratamento de recozimento. Durante a análise em quatro pontos distintos, não foram observadas alterações visíveis no formato de grão que caracterizam o encruamento, sugerindo que os danos ocorridos são de natureza tribológica, ou que possíveis deformações se limitam apenas à camada superficial do material, que não pôde ser analisada com detalhes, devido à dificuldade de acessar a região mais próxima da superfície, por conta da existência de um chanfro na peça. Ademais, as medidas de dureza dos pontos de metalografia mostram valores que variam de 135 a 167 HB, condizente com a dureza do material no estado recozido. Além disso pela presença de zonas com possíveis danos de desgaste nos pontos analisados, as irregularidades na superfície podem ser decorrentes de mecanismos tribológicos, como o *fretting* contato e movimentos oscilatórios de baixo deslocamento e/ou deformação mecânica favorecida pela baixa dureza do material.

A microestrutura revelada levanta preocupações quanto à sua adequação do material para a aplicação em questão. A combinação de Ferrita e Perlita recozida sugere uma resistência inadequada para suportar os esforços associadas ao processo de estampagem na sobre-mesa da prensa. Portanto, com base nos resultados da análise microestrutural, fica evidente que o material utilizado na mesa da prensa de estampagem nas condições atuais de beneficiamento não é ideal para a aplicação pretendida, o que pode ser responsável pelas irregularidades observadas, reforçando a necessidade de um material com propriedades mais adequadas para suportar as forças e condições operacionais a que está sujeito.

5.3 VERIFICAÇÃO DE PARTÍCULAS DECORRENTES DE DESGASTE

Os resultados da verificação de partículas na amostra de óleo coletada podem ser visualizados na Figura 37. No item (a) é possível notar a amostra de óleo, conforme coletada, sem a presença de um ímã próximo da amostra, dessa maneira, nenhuma partícula é visível. No item (b), com a aproximação de um ímã, percebe-se que pequenas partículas são atraídas pelo campo magnético introduzido.

Figura 37 - Verificação de partículas magnéticas no óleo da mesa de estampagem. Sem aproximação de um ímã (a). Com ímã aproximado (b).



Fonte: Autor (2023).

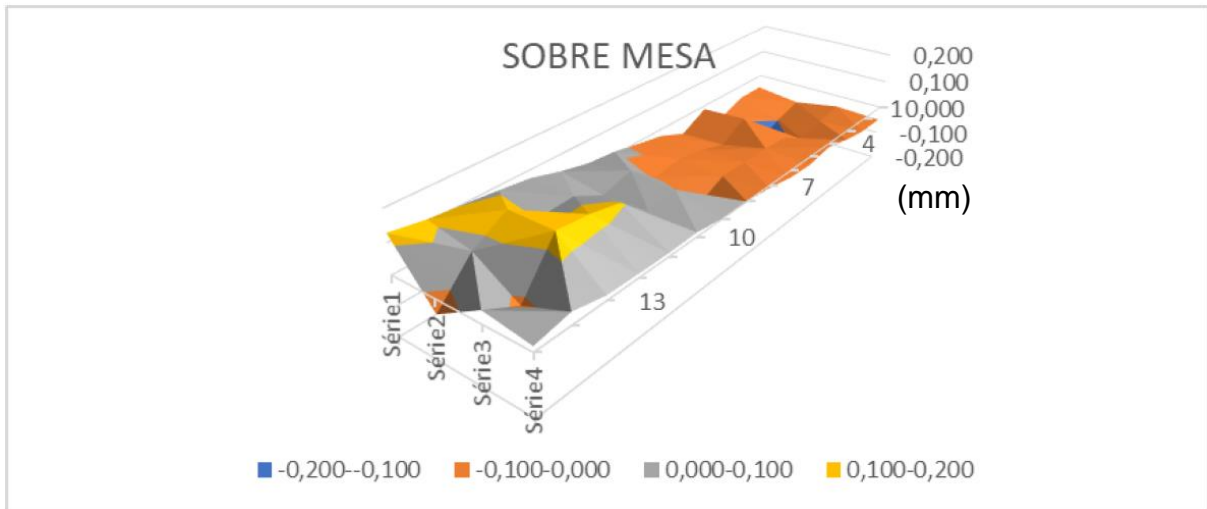
Esse resultado trata-se de mais um indicativo de danos de caráter tribológico, causados pelo fenômeno de *fretting*. As partículas, por serem atraídas por um campo magnético possuem natureza ferrítica, condizentes com partículas que seriam arrancadas pelo desgaste ocasionado por esse fenômeno, conforme descrito na Seção 3.4.2. Entretanto, análises mais aprofundadas dessas partículas, como análises químicas e morfológicas, por Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV) são recomendadas para melhor caracterizá-las.

5.4 ANÁLISE DIMENSIONAL

5.4.1 Medição de Planeza

Medições de planeza foram realizadas para verificar se a peça se encontra dentro do recomendado pela Norma DIN 8651 (1990). A Figura 38 mostra um gráfico gerado em 3D da avaliação de planeza da sobre-mesa.

Figura 38 - Gráfico 3D de avaliação de planeza da sobre-mesa.



Fonte: Autor (2023).

Para o cálculo do desvio de planeza é considerada a diferença entre o ponto mais alto registrado, 0,141 mm, e mais baixo medido na peça, -0,143 mm, dessa maneira, o desvio apresentado pela peça é de 0,284 mm com erro acumulado de $\pm 0,10$. Como a peça possui 2,8 m de comprimento, o valor equivale a 0,101 mm/m, estando este valor acima do recomendado pela Norma. Variações de planeza resultam em elevadas rebarbas nas peças produzidas e disruptivas interrupções de manutenção corretiva tanto na sobre-mesa quanto nas ferramentas de estampagem.

5.4.2 Medição com Relógio Comparador

As medições realizadas com o relógio comparador nas regiões afetadas permitiram analisar a amplitude das variações dimensionais na mesa de prensa de estampagem. Os resultados são expostos na Tabela 6.

Tabela 6 - Medidas com relógio comparador das regiões afetadas na parte superior da sobremesa "B", no rebaixo "D", na mesa da prensa "G" e no calço da ferramenta "H".

Profundidade dos danos (mm)	1	2	3	4	5	Média	Desvio Padrão
Varição na região superior "B"	0,11	0,11	0,15	0,11	0,06	0,11	0,03
Varição no rebaixo "D"	0,25	0,12	0,12	0,11	0,13	0,15	0,06
Varição na mesa	0,22	0,18	0,16	0,23	0,22	0,20	0,03
Varição no berço da ferramenta	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,01

Fonte: Autor (2023).

A região da mesa revelou a maior variação dimensional, uma vez que nunca passou por um processo de usinagem corretiva desde sua aquisição, em 2012, portanto está por mais tempo em serviço. A ausência desse procedimento de nivelamento e correção de irregularidades pode ser apontada como uma das causas principais para a maior variação observada nessa área, que possui uma profundidade média de 0,20 mm.

A sobre-mesa, por sua vez, já foi corrigida anteriormente, entretanto, ainda foram identificados consideráveis danos nessa parte da estrutura, com magnitude média de 0,11 mm na região superior “B” e com 0,15mm na região do rebaixo “C”. Isso sugere que apesar da medida corretiva prévia, a sobre-mesa continua sofrendo danos.

Além disso, foi observado que a variação dimensional no calço da ferramenta é consideravelmente menor em comparação com os danos encontrados na mesa e na sobre-mesa, alcançando um valor médio de 0,03 mm. Entretanto, é importante ressaltar que, embora as variações dimensionais sejam menores nessa peça, deve-se considerar que diferentes ferramentas são utilizadas na mesma sobre-mesa, além de que todas as ferramentas após utilizadas na prensa são encaminhadas para avaliações de necessidade de manutenção corretiva, sendo essas recuperadas com frequência alta. Além disso, vale destacar que na região inferior do berço não deveria existir nenhum dano, já que existe uma folga teórica de 0,05 mm entre a sobre-mesa e o berço inferior. Não foi possível realizar medidas no berço inferior, entretanto, danos nessa região da ferramenta são frequentes, segundo dados internos da Seção de Manutenção de Ferramentas da empresa, o que também caracteriza em custosas intervenções de manutenção corretiva.

5.4.3 Medição com Dispositivo de Cota de Profundidade

A medição da profundidade do rebaixo da sobre-mesa de prensa de estampagem, realizada por um dispositivo de cota de profundidade, proporcionou uma compreensão mais aprofundada das variações dimensionais e dos problemas estruturais presentes. Os resultados são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Medições com dispositivo de cota de profundidade na região sem danos "C" e com danos "D".

Profundidade rebaixo (mm)	1	2	3	4	5	Média	Desvio Padrão
Região sem danos "C"	110,00	110,00	110,00	110,00	110,00	110,00	0,00
Região com danos "D"	109,72	110,14	110,14	110,64	109,50	110,03	0,44

Fonte: Autor (2023).

Nas regiões sem danos do rebaixo, as medidas revelaram-se precisas e consistentes, apresentando a profundidade normal do rebaixo, de exatos 110,00 mm. Isso sugere que nessas áreas específicas, a estrutura se mantém íntegra e dentro das especificações desejadas.

No entanto, as regiões identificadas como problemáticas exibiram medidas com erros aleatórios. Isso indica que em algumas áreas a variação dimensional é mais proeminente na superfície superior, enquanto em outras, é no rebaixo, resultando em variações dimensionais consideráveis e aleatórias. Essas variações não seguem um padrão específico, mostrando que a irregularidade na profundidade do rebaixo é variável e distribuída em áreas distintas, o que implica em mais problemas de planeza e de caráter tribológico, fazendo com que os pontos de apoio das ferramentas sejam aleatoriamente distribuídos sobre a região do rebaixo da sobre-mesa.

Apesar da variação acentuada nas medições, o valor médio não apresentou uma mudança tão significativa. Isso se deve ao fato de que, em algumas medições, o valor foi menor do que o nominal, enquanto em outras, foi maior, equilibrando a média total.

5.5 MEDIÇÕES DE DUREZA

O mapeamento de durezas realizado em vários pontos da sobre-mesa, mesa e ferramenta de estampagem proporcionou informações interessantes sobre as características dos materiais nas diferentes regiões. A Tabela 8 sumariza os resultados obtidos.

Tabela 8 - Mapeamento de durezas na sobre-mesa, mesa e ferramenta de estampagem.

Dureza (HB)		1	2	3	4	5	Média	Desvio Padrão
Sobre-mesa	Região superior sem danos "A"	156	140	145	136	143	144	8
	Região superior com danos "B"	140	142	143	136	147	142	4
	Região do rebaixo sem danos "C"	137	148	133	151	125	139	11
	Região do rebaixo com danos "D"	179	166	150	161	151	161	12
Mesa	Região sem danos	152	145	138	141	141	143	5
	Região com danos	176	170	158	160	162	165	8
Ferramenta	Berço	179	130	171	130	175	157	25
	Calço	152	155	141	150	150	150	5

Fonte: Autor (2023).

As áreas identificadas como sem danos exibem uma dureza que pode ser considerada como a dureza inicial da peça. Essa referência é de suma importância para a compreensão da variação das propriedades mecânicas em áreas afetadas em comparação com a condição original do material.

Os resultados demonstraram que tanto o berço quanto o calço da ferramenta de estampagem apresentam inicialmente uma dureza superior à sobre-mesa e à mesa. Inicialmente a sobre-mesa possui dureza de 144 HB na região "A" e 139 HB na região "C" e a mesa apresenta 143 HB na região sem danos, enquanto o berço da ferramenta apresentou dureza inicial de 157 HB e o calço de 150 HB. Essa diferença de dureza entre essas partes ressaltam a importância da seleção e qualidade dos materiais empregados. Esses resultados indicam que há uma resistência maior na ferramenta do que no material da sobre-mesa e da mesa, sendo que a seleção dos materiais da ferramenta é realizada com o intuito de ser menos resistente do que a sobre-mesa, conforme mencionado na Seção 4.

Nas áreas com danos, tanto do rebaixo, quanto da mesa, foi observado um aumento na dureza, o que se caracteriza como um indício de encruamento dos grãos superficiais. Essa alteração na dureza, possivelmente causada pelas tensões compressivas na região, revela uma modificação na estrutura do material. O encruamento dos grãos representa uma resposta do material à deformação e às tensões presentes, buscando aumentar sua resistência local. Percebe-se que a região do rebaixo da sobre-mesa aumentou sua dureza de 139 HB para 161 HB e a mesa aumentou de 143 HB para 165 HB. A região "B" da sobre-mesa, no entanto, não teve

um aumento de sua dureza, possivelmente em decorrência da folga teórica de 0,05 mm, que faz com que a tensão não seja aplicada com predominância nessa região. Entretanto a presença de danos visíveis nessa região é um indicativo de fortes danos de caráter tribológico, conforme discutido anteriormente.

Essa análise direciona a necessidade da seleção de materiais mais duros e resistentes, capazes de manter suas propriedades estruturais para a sobre-mesa e mesa, diante das demandas da aplicação. Este é mais um aspecto que demonstra que o material identificado, aço DIN 1.2312 recozido, não possui propriedades adequadas para a aplicação, apresentando durezas menores do que a ferramenta que entra em contato com ele, e conseqüentemente, recebendo a maior parcela de desgaste e possivelmente deformação.

5.6 MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE

As medições de rugosidade desempenham um papel importante na investigação auxiliar a identificar os mecanismos existentes nos danos avaliados. A metodologia utilizada foi comparar as rugosidades entre a região com e sem danos. Os dados coletados de rugosidade média R_a podem ser observados na Tabela 9 e os de rugosidade máxima R_{max} são apresentados na Tabela 10.

Tabela 9 - Medidas de rugosidade média R_a .

Rugosidade R_a (μm)	1	2	3	4	5	Média	Desvio Padrão
Zona sem danos "A"	0,983	1,387	1,223	0,917	1,282	1,158	0,201
Zona com danos "B"	0,668	1,319	0,379	0,888	0,678	0,786	0,349
Rebaixo sem danos "C"	1,605	2,215	1,363	1,360	1,581	1,625	0,350
Rebaixo com danos "D"	1,342	1,159	1,600	0,957	0,878	1,187	0,293

Fonte: Autor (2023).

Tabela 10 - Medidas de rugosidade máxima R_{max} .

Rugosidade R_{max} (μm)	1	2	3	4	5	Média	Desvio Padrão
Zona sem danos "A"	6,041	12,806	12,068	12,663	10,608	10,837	2,819
Zona com danos "B"	8,330	12,015	4,853	10,874	9,980	9,210	2,783
Rebaixo sem danos "C"	15,958	23,454	13,67	12,455	6,344	14,376	6,197
Rebaixo com danos "D"	15,107	8,807	12,302	7,898	10,186	10,860	2,897

Fonte: Autor (2023).

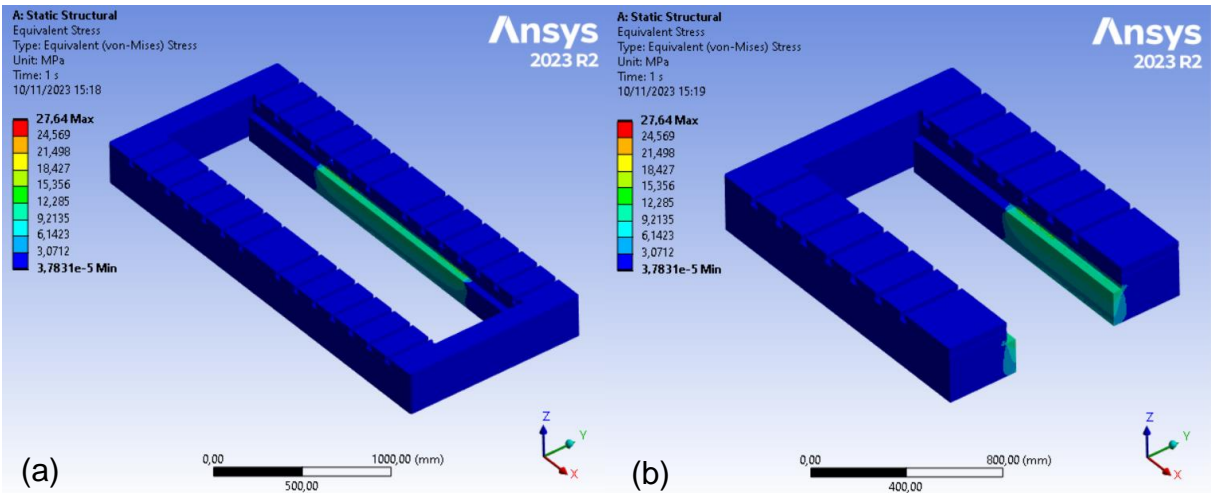
Inicialmente, a comparação mostra que a rugosidade R_a na região sem danos é, em geral, maior do que na região com danos. Esse achado é um indício de que a região afetada pode estar sofrendo de deformação localizada, já que os picos de rugosidade da superfície tendem a ser reduzidos quando comprimidos e deformados. Analogamente, as regiões sem danos apresentam pontos de rugosidade R_{max} maiores quando em comparação com as regiões com danos, sendo esses também indícios de deformações.

No entanto, existe uma complicação na interpretação dos resultados. A sobre-mesa exibe diversas marcações de uso em sua superfície, o que dificulta a obtenção de dados de rugosidade precisos. Essas marcações de uso, provavelmente devido à prensagem de rebarbas e retalhos metálicos durante o processo produtivo, interferem na medição da rugosidade, tornando os resultados pouco confiáveis e, conseqüentemente, dificultando a distinção entre a causa raiz do problema.

5.7 SIMULAÇÃO DE ESFORÇOS

Os resultados da simulação de esforços realizada pelo *software ANSYS* no aço DIN 1.2312, mostraram que a tensão encontrada com a aplicação de uma carga é de magnitude muito baixa, tendo um valor máximo de 27,64 MPa, entretanto, ao longo da superfície afetada da peça, como é possível visualizar na Figura 39 (a), os valores de tensão se encontram em torno de 10 MPa. Além disso, ao analisar a distribuição de esforços em um corte de seção da peça, como mostra o item (b), é possível notar que os esforços são de caráter predominantemente superficial, com tensões internas encontrando-se em torno de 5 MPa.

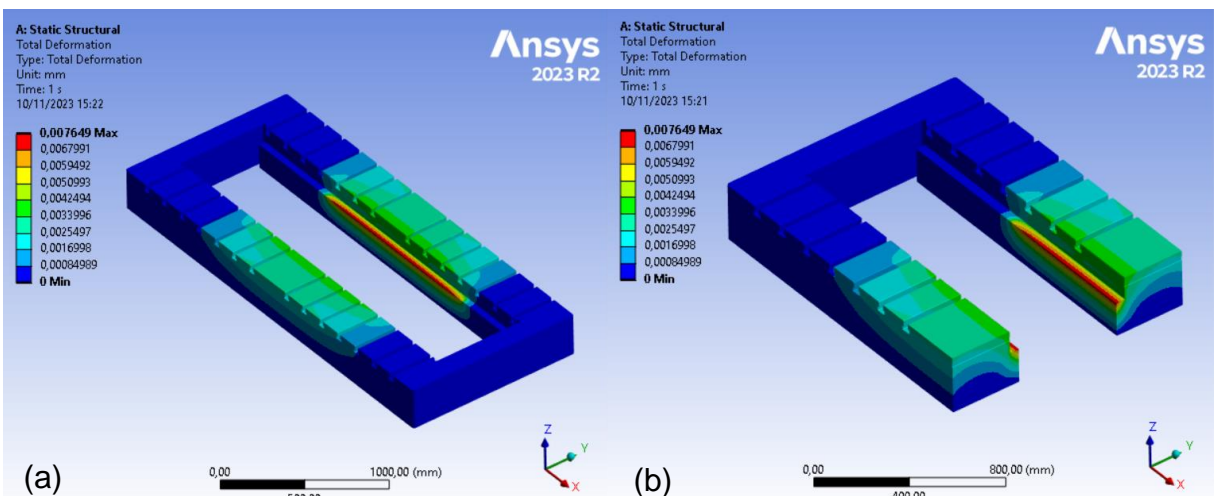
Figura 39 - Resultados da simulação de tensão equivalente (Von-Mises) na sobre-mesa em aço DIN 1.2312 em vista isométrica (a) e em corte de seção (b).



Fonte: Autor (2023).

Em relação aos resultados de deformação total, como mostra a Figura 40 (a), percebe-se que os pontos de máxima deformação (regiões destacadas em vermelho), apresentam deformação de 0,0076 mm com a aplicação de uma carga. Além disso, na vista em seção (b) é possível notar também que a deformação é de caráter predominantemente superficial, uma vez que os valores de deformação internos se encontram por volta de 0,0020 mm, sendo praticamente insignificantes para a estrutura avaliada.

Figura 40 - Resultados da simulação de deformação total na sobre-mesa em aço DIN 1.2312 em vista isométrica (a) e em corte de seção (b).



Fonte: Autor (2023).

Além disso, é possível destacar que o perfil de deformações ao longo da peça encontra-se próximo ao esperado, levando em consideração as regiões marcadas por danos visíveis na peça real. Além da deformação mais concentrada na área de contato com o calço da ferramenta, naturalmente, é possível observar uma deformação considerável destacada na cor verde na extremidade da região superior da sobre-mesa, que é uma região onde existem indícios de desgaste por contato, causado pelo possível deslocamento dessa região com a aplicação das cargas de estampagem.

Ao comparar com os resultados de Tensão Equivalente Máxima e Deformação Total máxima para os aços DIN 1.2312 Recozido e o aço AISI 4140 Normalizado, percebe-se que a tensão equivalente é idêntica entre os materiais e a deformação encontrada é levemente menor. Isso ocorre, pois o nível de tensão é muito abaixo da tensão de escoamento dos materiais, e não chega a impactar significativamente com a aplicação de uma carga estática. Além disso, vale salientar que as regiões de tensões e deformações ao longo da peça em ambos materiais são praticamente as mesmas, dessa maneira, os dados foram sumarizados na Tabela 11.

Tabela 11 - Comparação de Tensão Equivalente Máxima (MPa) e Deformação Total Máxima (mm) para os aços DIN 1.2312 Recozido e AISI 4140 Normalizado.

Material	Tensão Equivalente Máxima (MPa)	Deformação Total Máxima (mm)
DIN 1.2312 Recozido	27,64	0,007649
AISI 4140 Normalizado	27,64	0,007631

Fonte: Autor (2023).

Essa análise leva a inferir que, caso existam mecanismos de deformação, sua natureza é meramente superficial e acentuada pelos ciclos de prensagem aos quais o material é submetido durante o processo de estampagem. Outro ponto a ser destacado é a presença de diversas marcações na superfície do material que podem ser pontos de tensão concentrada, conforme descrito na Seção 3.4.1. Para análises mais aprofundadas uma simulação de vida em fadiga pode ser futuramente realizada, com esforços cíclicos, para melhor simular as condições de operação da prensa. Com essa medida será possível estimar o ganho de durabilidade com uma possível substituição do material.

5.8 PROPOSTAS CORRETIVAS

Com base na análise realizada algumas opções podem ser consideradas para aprimorar a durabilidade e o desempenho da estrutura, bem como otimizar os custos associados à manutenção corretiva. Essas opções são a substituição total do material, aplicação de tratamentos térmicos ou termoquímicos no material atual, implementação de réguas na sobre-mesa e elevação da ferramenta para aumentar a folga entre o berço e a superfície superior da sobre-mesa.

5.8.1 Substituição Completa do Componente

Visto que o aço é inadequado para a aplicação, a solução mais natural seria a substituição completa da sobre-mesa por um aço com melhores propriedades, como o aço AISI 4140 temperado e revenido com uma dureza próxima de 40 HRC, como mostrado na Seção 3.3.2. Entretanto, por ser uma peça de geometria complexa, devem ser avaliados os custos associados à obtenção do material bem como a usinagem, para verificar a viabilidade dessa proposta. Caso o AISI 4140 seja inviável, outra opção, de mais baixo custo seria a substituição pelo aço AISI 1045 normalizado, que já representaria uma melhora considerável nas propriedades quando em comparação com o aço atual. Apesar de ser um aço simples e de custo acessível, o AISI 1045 apresenta propriedades superiores ao material atual quando normalizado à 850 °C, podendo alcançar uma dureza de até 29 HRC (Manuel et al. 2021).

Vale destacar que essa abordagem apresenta grande risco, afinal, o componente em questão possui uma geometria complexa, sua usinagem seria possivelmente custosa e atualmente a empresa não possui o desenho técnico com todas as cotas necessárias para a usinagem. Isso implicaria em um elevado tempo investido em desenhar o componente, além do risco de possíveis erros no projeto, decorrentes de falhas nos valores das medidas coletadas.

5.8.2 Tratamentos Térmicos ou Termoquímicos no Componente

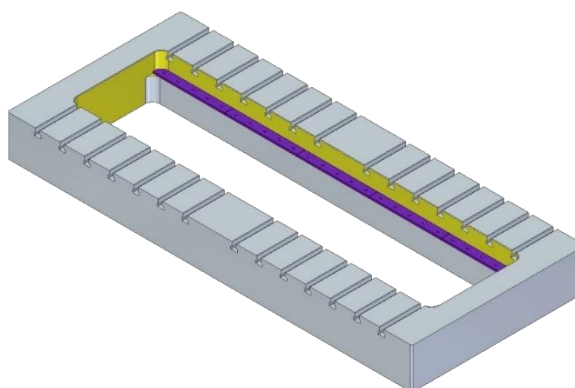
Outra opção, com o intuito de aproveitar a peça atual, seria realizar tratamentos térmicos ou termoquímicos na peça existente. Nitretar a superfície por plasma até 0,2 mm, conforme discutido na Seção 3.5.4, sem gerar uma camada branca, optando por uma zona difusa de nitretos na região superficial do material, com

uma dureza mínima de 30 HRC seria, possivelmente, a melhor alternativa, por conta da baixa deformação causada no material por esse processo. Outras alternativas seriam a cementação ou têmpera com revenimento, entretanto, deve ser levado em consideração que possíveis distorções decorrentes desse processo precisam ser posteriormente corrigidas.

5.8.3 Aplicação de Réguas Intercambiáveis na Sobre-mesa

Por fim, é importante considerar a possibilidade de implementação de réguas de aço AISI 4140 ou ASTM P20+S nas condições de têmpera com revenimento no rebaixo da sobre-mesa, de maneira análoga às réguas existentes no calço da ferramenta. Por possuírem uma dureza mais elevada, a aplicação das réguas aumentaria a durabilidade da sobre-mesa, conforme descrito na Seção 3.3.2. Além disso, é possível controlar os danos e a planeza nas réguas somente, e caso identificadas irregularidades, sua substituição corretiva é simples, evitando também grandes períodos de máquina parada para correções, como ocorre atualmente. Um protótipo dessa proposta pode ser visualizado na Figura 41. A proposta consiste na implementação de cinco réguas $\frac{1}{2}$ " de espessura e aproximadamente de 500 mm de comprimento, em cada lado do rebaixo da sobre-mesa, com uma folga de 1,5 mm entre elas e entre as paredes internas da sobre-mesa, com o intuito de facilitar a montagem e evitar mais danos relacionados ao desgaste entre réguas. Para a fixação são previstos três parafusos escareados por régua, a fim de manter a planeza da superfície.

Figura 41 – Protótipo da proposta referente à implementação de réguas de aço AISI 4140 temperado e revenido na região do rebaixo da sobre-mesa.



Fonte: Autor (2023).

5.8.4 Aumentar a Folga Entre Superfícies em Contato Indevido

Além das propostas citadas anteriormente em relação ao material, para evitar danos por desgaste na região superior da sobre-mesa e região do berço da ferramenta, vale considerar aumentar a altura do calço em 0,05 mm, garantindo uma folga mínima de 0,1 mm entre estes componentes. Vale destacar que para que essa implementação seja eficiente, a fixação da ferramenta na prensa deve ser realizada de maneira adequada, apertando os pontos de fixação de maneira cruzada, para evitar desvios de planeza decorrentes da montagem. A execução desta modificação pode ser facilmente alcançada por uma alteração na espessura das réguas já existentes sob o calço das ferramentas.

Ademais, propõe-se o acompanhamento periódico de danos em uma sobre-mesa recém corrigida por usinagem, para avaliar como os danos se comportam ao decorrer do tempo. Medidas de planeza na região do rebaixo e da superfície superior, medidas de altura do rebaixo com dispositivo de cota de profundidade e medidas dos danos com relógio comparador, como as descritas na Seção 4.4 podem ser realizadas mensalmente, para obtenção de mais informações referentes ao problema. Além disso, é proposto o mesmo acompanhamento em uma sobre-mesa após a execução de alguma das melhorias citadas.

6 CONCLUSÃO

O material identificado na sobre-mesa é inadequado para a aplicação, por conta de sua microestrutura e propriedades, e está apresentando indícios de desgaste e deformação localizada.

Nos resultados de análise química foi constatado que o material da sobre-mesa se trata do aço DIN 1.2312 (ASTM P20+S), um aço baixa liga de boa usinabilidade, alto potencial para ser endurecido, entretanto, baixa dureza e resistência mecânica, especialmente no estado recozido.

Com a micrografia *in loco* foi possível identificar uma microestrutura consistente com a de um aço recozido, composta de ferrita e perlita. Além disso, a micrografia mostra a possível presença de sulfetos e danos decorrentes de mecanismos de *fretting*, tais como microtrincas e pequenos arrancamentos de partículas.

Na análise de resíduos sobre a mesa de estampagem foram identificadas partículas de caráter metálico ferromagnético na superfície da mesa de estampagem, sendo este mais um indício de desgaste por *fretting* e/ou adesão.

Em relação à varredura de durezas foi constatada uma dureza média na região sem danos do rebaixo de 139 MPa e na região com 161 MPa, o que é um indício encruamento superficial nessa região, por tensão acumulada, apesar de não terem sido identificados alongamentos nos grãos lateralmente, pela micrografia.

A avaliação de planeza identificou que a peça se encontra fora dos parâmetros requeridos pela norma DIN 8651 (1990), o que pode levar à danos prematuros em ferramentas de estampagem.

As medidas de profundidade dos danos com relógio comparador identificaram variações dimensionais de até 0,20 mm e as medidas com dispositivo de cota de profundidade identificou variações dimensionais aleatórias ao longo da região com danos com desvio padrão de 0,44 mm da dimensão nominal.

As medidas de rugosidade identificaram valores R_a e R_{max} menores nas regiões com danos, o que pode ser outro indicativo de deformações localizadas, entretanto a avaliação desses resultados foi dificultada pela má qualidade superficial da peça em questão.

A simulação de esforços realizada identificou níveis de tensão muito baixos, em relação à um esforço estático com a carga aplicada durante o processo produtivo,

o que implica que os danos no material podem estar sendo potencializados por fenômenos de desgaste.

Dentre os métodos propostos para a solução do problema as opções são a substituição total do material por aços AISI 4140 temperado e revenido ou AISI 1045 normalizado; tratamentos superficiais de nitretação à plasma no material atual; substituição do material das réguas do calço das ferramentas, embora esse não seja o mais indicado; implementação de réguas na sobre-mesa, de material AISI 4140 temperado e revenido; elevação ferramenta para aumentar a folga entre o berço e a superfície superior da sobre-mesa. O método possivelmente mais viável e que resolveria o problema por completo é o de nitretação à plasma nos três componentes principais, sendo esses, a mesa, sobre-mesa e sobre-placa. Entretanto, vale destacar, que futuras análises em relação à viabilidade financeira devem ser executadas para verificar com mais assertividade esse aspecto, incluindo a realização de orçamentos referentes às outras propostas de solução apresentadas e análises mais detalhadas em relação aos gastos decorrentes dos danos apresentados.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros, sugere-se a investigação de danos na sobre-mesa envolvendo as seguintes abordagens:

- Monitorar periodicamente os danos em uma sobre-mesa recém usinada corretivamente;
- Analisar a viabilidade técnica da execução dos tratamentos térmicos propostos nos componentes abordados neste estudo;
- Realizar uma análise de viabilidade econômica para as propostas corretivas sugeridas;
- Acompanhar periodicamente os danos em uma sobre-mesa com medida corretiva, para validar a solução;
- Verificar vibrações por meio de sensores para aprofundar a análise de *fretting*;
- Realizar simulação de elementos finitos esforços cíclicos para determinar vida por fadiga dos componentes;
- Comparar danos relacionados à manutenção em prensas com e sem medida corretiva;
- Executar uma análise química e por MEV dos resíduos de desgaste;
- Fazer estudos com réplica metalográfica na região com danos (sem limpeza e preparação prévia);
- Realizar um aprofundamento dos estudos relacionados aos mecanismos de desgaste.

REFERÊNCIAS

ANDRADAS, M. F. L. **Pré-projeto de estampo para fabricação da tampa de embreagem para veículos de passeio.** Departamento de Engenharia Mecânica. Niterói: Universidade Federal Fluminense, 2016.

ANSYS, **Banco de dados Granta.** 2023.

ASM HANDBOOK COMMITTEE. **ASM Handbook, Volume 10: Materials Characterization.** Materials Park: ASM International, 2019.

ASM HANDBOOK COMMITTEE. **ASM Handbook, Volume 19: Fatigue and Fracture.** Materials Park: ASM International, 1996.

BARROS, B. A. **A importância da manutenção industrial como ferramenta estratégica de competitividade.** Miracema: Faculdade Redentor, 2018.

BLACK, J. T.; KOHSER, R. A. **DeGarmo's materials and processes in manufacturing.** 10. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, INC, 2008.

BOLDEA, I.; NASAR, S. A. **Electric drives.** 2. ed. Abingdon: Taylor & Francis Group, 2005.

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, K. J. **Shigley's mechanical engineering.** 8.ed. New York: McGraw Hill, 2006.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma Introdução.** 8.ed, São Paulo: LTC, 2012.

CELESTINO, P. A. P., FELIPE, R. C. T. S.; MACHADO, T. G. **Análise comparativa entre o tratamento térmico (têmpera) e o tratamento termoquímico (cementação) realizado em aço 1040.** Natal: CEFET-RN., Holos Vol 3, 2007.

CHANDLER, H. **Heat treater's guide: practices and procedures for irons and steels**. 2. ed. Materials Park: ASM International, 2010.

CHIAVERINI, V. **Tratamento térmico das ligas metálicas**. São Paulo: ABM, 2008.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3.ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1974.

CORRÊA, D. R. **Relação entre dureza, desgaste e microestrutura do par tribológico formado por aço SAE 1045 e óxido de zircônio**. Departamento de Engenharia Mecânica. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

DIETER, G. E.; SCHMIDT, L. C. **Engineering Design**. 5.ed. New York: Mc Graw Hill, 2018.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 8651: 1990-05. Machine tools; straight-sided mechanical presses; acceptance conditions**: Berlin: DIN, 1990.

DOS SANTOS. M. C. **Desenvolvimento de um plano de manutenção preventiva e preditiva para a melhoria da confiabilidade de um processo industrial automatizado**. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Departamento de Engenharia Mecânica. Brasília: Faculdade de Tecnologia Universidade de Brasília, 2019.

DOSSETT, J. L.; TOTTEN G. E. **Steel heat treating fundamentals and processes**. Vol 4A. Materials Park: ASM International, 2013.

FRATESCHI, C; NEGRINI, L. G.: **Estampos de corte: elementos**. São Carlos: Edusp, 1983.

GARCIA, A. G.P. **Impacto da lei de eficiência energética para motores elétricos no potencial de conservação de energia na indústria**. Dissertação de Mestrado em Planejamento Energético. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2003.

HENZOLD, G. **Geometrical dimensioning and tolerancing for design, manufacturing and inspection**. Amsterdam: Elsevier, 2006.

HESPANHOL, H. C. **Eletroerosão por fio em metal duro para ferramentas de estampagem de lâminas de motores elétricos**. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2010.

HOSFORD, W.F.; CADDELL, R. M. **Metal Forming: mechanics and Metallurgy**. 4.ed. New York: Cambridge University Press, 2018.

HURRICKS, P. I. **The mechanism of fretting: a review**. Lausanne: Elsevier Sequoia S. A., 1970.

INGOLE, S.; MENEZES, P. L.; NOSONOVSY, M. **Tribology for scientists and engineers**. New York: Springer, 2013.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing engineering and technology**. 8. ed. London: Pearson Education Limited, 2023.

KARA, F. **Optimization of surface roughness in finish milling of AISI P20+S plastic-mold steel**. Düzce: Düzce University, 2018.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e transformadores**. Vol I. Porto Alegre: Globo, 1982.

LECO INSTRUMENTOS LTDA. **Analisador de combustão Série 844: analisador de carbono e enxofre de bancada para amostras de metais e inorgânicas**. São Paulo: Leco Ltda., 2023. Disponível em: < <https://pt.leco.com/product/844-series/> >

LEE, Y.L.; PAN, J.; HATHAWAY, R. B.; BARKEY, M. E. **Fatigue testing and analysis: theory and practice**. Amsterdam: Elsevier, 2005.

LEITÃO, C. J.; MEI, P. R.; LIBARDI, R. **Efeitos da cementação e da nitretação no custo e na qualidade de engrenagens produzidas com aços ABNT 4140 e 8620**. Vol 9, n.3. São Paulo: Tecnol. Metal. Mater. Miner, 2012.

LEITE, W. F. **Dissolução de óxidos formados a altas temperaturas nos aços elétricos variando-se a temperatura e concentração da solução ácida na decapagem**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

MANUEL, P. F. L.; JESÚS, V. H. Á.; GABRIELA, T. H. Y.; ALEJANDRO, A. T. **Efecto de la temperatura de normalizado sobre la microestructura y propiedades mecánicas de un acero AISI 1045**. Departamento de Materiales. Ciudad de México: Universidad autónoma metropolitana, 2021.

MORGADO, D. F. N. **Otimização do processo de projeto de uma ferramenta progressiva para a estampagem de componentes metálicos**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica. Lisboa: , Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013.

MOAVENI, S. **Finite element analysis: theory and application with ANSYS**. New Jersey: Prentice Hall, 1999.

NETO, N. P. **Componentes de uma prensa mecânica**. São Bernardo do Campo: Arandanet, 2022.

PFEIFFER, S.; FIEDLER, M.; BERGELT, T.; KOLOUCH, M.; PUTZ, M.; WAGNER, M. F-X. **On the correlation of hammer-peened surfaces and process, material and geometry parameters**. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Bristol: IOP Publishing Ltd., 2023.

PICCOLI, R. M. **Análise dos parâmetros que influenciam na precisão de componentes fabricados pelo processo de estampagem progressiva.** Caxias do Sul: Universidade De Caxias Do Sul, 2013.

PINTO, A. K.; XAVIER, J. A. N. **Manutenção: função estratégica.** 2. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2004.

PROVENZA, F. **Estampos.** Vol 1. São Paulo: PRO-TEC, 1993.

RIOS, C. T.; AMARAL, M. P.; SOUZA, E. S. **Influência de tratamentos térmicos na microestrutura e propriedades mecânicas do aço SAE 4140.** 22º Congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais. Santo André: Universidade Federal do ABC, 2016.

RODRIGUES, A. J. M. **Desenvolvimento e projeto de um sistema de controlo de segurança em processo de estampagem.** Departamento de Engenharia Eletrônica. Dissertação de Mestrado. Coimbra: 2015.

RODRIGUES, J.; MARTINS, P. **Tecnologia mecânica.** 1. Ed, Lisboa: Escolar, 2005.

ROSSNAGEL, S.M.; CUOMO, J.J.; WESTWOOD, W.D. **Handbook of plasma processing technology: fundamentals, etching, deposition and surface interactions.** New Jersey, Noyes, 1989.

SCHAFFER, L. **Conformação Mecânica.** 2. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.

SCHULER, **Manual prensa rápida Schuler excêntrica de alto rendimento e duas colunas, modelo SAL400-2,80.** São Paulo: Schuler-Pressen, 2012.

SCHEY, J. A. **Introduction to manufacturing processes.** 2. ed. New York: McGraw Hill Book Company, 1987.

SCHIJVE, J. **Fatigue of structures and materials.** 2.ed. Amsterdam: Springer, 2009.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012.

SILVA, A. L. C.; MEL, P. R. **Aços e ligas especiais**. Sumaré: Eletrometal S. A., 1988.

VOORT, G. F. V. **Metallography: principles and practice**. Materials Park: ASM International, 2007.

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A. **Institucional**. Jaraguá do Sul: WEG S.A., 2023. Disponível em: <<https://www.weg.net/institucional/BR/pt/>>

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A. **Norma interna WPS-4378 PT rev 07: análise de materiais por espectrometria de plasma**. Jaraguá do Sul: Seção de Tecnologia de Materiais, 2023.

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A. **Norma interna WPS-4474 PT rev 04: análise de materiais pelo determinador de carbono e enxofre Leco**. Jaraguá do Sul: Seção de Tecnologia de Materiais, 2023.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. **The finite element method: the basis**. 5.ed. vol 1, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.