

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

FRANCISCO ALVES DE LIMA JÚNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO DE EXTRAÇÃO FABRICADO EM AÇO
INOXIDÁVEL AISI 420 TRATADO TERMICAMENTE E SUPERFICIALMENTE**

RECIFE

2022

FRANCISCO ALVES DE LIMA JÚNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO DE EXTRAÇÃO FABRICADO EM AÇO
INOXIDÁVEL AISI 420 TRATADO TERMICAMENTE E SUPERFICIALMENTE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), do Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Engenharia de Materiais e Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira

RECIFE

2022

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

- L732d Lima Júnior, Francisco Alves de.
Desenvolvimento de dispositivo de extração fabricado em aço inoxidável AISI 420 tratado termicamente e superficialmente / Francisco Alves de Lima Júnior. - 2022.
231 folhas, il.; tab.
- Orientador: Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira.
- Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2022.
Inclui Referências.
1. Engenharia Mecânica. 2. Dispositivo de extração. 3. Aço inoxidável.
4. Tratamento térmico e superficial. I. Ferreira, Ricardo Artur Sanguinetti (Orientador).
II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-209

FRANCISCO ALVES DE LIMA JÚNIOR

**“DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO DE EXTRAÇÃO FABRICADO EM AÇO
INOXIDÁVEL AISI 420 TRATADO TERMICAMENTE E SUPERFICIALMENTE”**

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico de Tecnologia e Geociências, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Engenharia de Materiais e Fabricação.

Aprovado em: 21/02/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira (Orientador/Presidente)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Oscar Olímpio de Araujo Filho (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Kleber Goncalves Bezerra Alves (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Cezar Henrique Gonzalez (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. YOGENDRA PRASAD YADAVA (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Aos meus pais, Francisco Lima e Antônia Lima, pelo esforço e dedicação à minha educação. A todos os meus familiares e amigos, e a todos os mentores e mestres responsáveis por minha formação acadêmica e profissional, os quais me apresentaram os valores inerentes ao profissional de sucesso e da ética presente nos indivíduos de boa índole.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por todas as bênçãos que tem me proporcionado.

Aos meus pais, Francisco Lima e Antônia Lima, por todo empenho a fim de me prover a melhor educação e aos meus irmãos, José Aildo, Cezaneide, Sueli, Suelene e André.

A minha namorada, Thaiza Araújo, pelo amor, incentivo e companheirismo pessoal e profissional.

Ao Professor Doutor Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira, meu amigo e orientador. Muito obrigado por sua capacidade de suportar todas as minhas dúvidas, conduzindo de maneira segura em todo o trajeto desta pesquisa. Além de tudo, por sua elegância no trato pessoal durante a pesquisa.

Não poderia deixar de agradecer aos amigos que, quando recorridos, esforçaram-se para cooperar e apoiar neste desafio: Professor Doutor Rogério Pontes, Engenheiros Especialistas Ricardo Gomes, Armando Trindade e João Padilha.

Aos consultores Victor Perboire, Ronald Silva, Thiago Poggi, Amanda Maranhão e Adailton Júnior, da Empresa Júnior de Consultoria, pelo suporte no desenvolvimento experimental do trabalho e apoio técnico.

Aos senhores Orlando Pereira, Rafael Pereira, Fabrício Gonçalves e o Engenheiro Especialista Sérgio Nabuco, das Empresas Executoras Parceiras, pelo suporte no desenvolvimento e fabricação dos protótipos, produtos finais acabados e no desenvolvimento dos tratamentos térmico e superficial aplicados, respectivamente.

Aos técnicos Alberto Azevedo, Marcílio Araújo e Eduardo Cabral, da Empresa Parceira Contratada, pelo suporte na execução dos ensaios de materiais.

A todos minha gratidão e respeito.

RESUMO

A pesquisa que deu origem a esta tese foi realizada a partir de demanda relacionada à necessidade de desenvolvimento de um novo dispositivo de extração de picolés a partir de um molde, em parceria com Empresas Fornecedoras nacionais, fabricado em material que proporcionasse maiores resistências às cargas impostas pelo processo fabril, com tratamento superficial resistente à corrosão imposta pelos líquidos sanitizantes utilizados, de forma a obter-se um dispositivo final com maior vida útil e menor custo de fabricação agregado. Todo o desenvolvimento do novo dispositivo teve como base análises estruturais dos seus componentes por meio dos métodos de elementos finitos e engenharia reversa, desenvolvimento de processos, ferramentas de fabricação e matrizes de conformação mecânica, além da caracterização de liga metálica com tratamento térmico com sequenciamento em consonância com o tratamento superficial com eletrodeposição de níquel. Para obtenção dos dados, os materiais que compõem os dispositivos foram ensaiados em equipamentos montados e calibrados em laboratório, conforme normativos técnicos, suportados por instrumentos, “*softwares*” e acessórios especificados, sendo também testados em condições reais de operação, em instalação fabril. Para registros dos dados, foram utilizados sistemas informatizados acessórios aos equipamentos utilizados nos ensaios dos materiais, assim como planilhas eletrônicas e “*softwares*” de controle estatístico de processo, durante a execução dos acompanhamentos de performance do dispositivo em campo. Os dados e resultados foram analisados segundo parâmetros e critérios de performance do dispositivo em campo, quanto à sua resistência mecânica e à corrosão, baseados em bibliografias e normas técnicas referentes às análises, ensaios e materiais empregados. Estes critérios abrangem o dimensionamento, cálculo e comparação de parâmetros de malha de elementos finitos, quando do material aplicado ao projeto, assim como melhorias nos processos de fabricação e tratamento superficial, visando um produto final mais eficiente. Foram avaliados os efeitos resultantes do uso do novo tipo de material, assim como os efeitos da aplicação dos tratamentos térmico e superficial. Foi observado que o dispositivo fabricado em aço inoxidável AISI 420 tratado termicamente e superficialmente apresentou maior resistência às cargas mecânicas impostas, maiores resistências à corrosão e ao desgaste, maiores vida útil e tempo de substituição, assim como menor custo de fabricação.

Palavras-chave: dispositivo de extração; aço inoxidável; tratamento térmico e superficial.

ABSTRACT

The research that gave rise to this thesis was carried out based on a demand related to the need to develop a new device for extracting popsicles from a mold, in partnership with national supplier companies, made of material that provided greater resistance to the imposed loads. by the manufacturing process, with a surface treatment resistant to corrosion imposed by the sanitizing liquids used, in order to obtain a final device with a longer useful life and lower aggregate manufacturing cost. The entire development of the new device was based on structural analysis of its components through finite element and reverse engineering methods, process development, manufacturing tools and mechanical forming matrices, in addition to the characterization of metal alloy with heat treatment with sequencing in in line with the surface treatment with nickel electrodeposition. To obtain the data, the materials that make up the devices were tested on equipment assembled and calibrated in the laboratory, according to technical regulations, supported by specified instruments, software and accessories, being also tested under real operating conditions, in a factory facility. To record the data, computerized systems were used, accessories to the equipment used in the testing of the materials, as well as electronic spreadsheets and software for statistical process control, during the execution of the monitoring of the device's performance in the field. The data and results were analyzed according to parameters and criteria of performance of the device in the field, regarding its mechanical and corrosion resistance, based on bibliographies and technical standards referring to the analyses, tests and materials used. These criteria cover the sizing, calculation and comparison of finite element mesh parameters, when the material applied to the project, as well as improvements in the manufacturing and surface treatment processes, aiming at a more efficient final product. The effects resulting from the use of the new type of material were evaluated, as well as the effects of the application of heat and surface treatments. It was observed that the device manufactured in AISI 420 stainless steel heat-treated and superficially presented greater resistance to the mechanical loads imposed, greater resistance to corrosion and wear, longer life and replacement time, as well as lower manufacturing cost.

Keywords: extraction device; stainless steel; heat and surface treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Estrutura do WCM.....	49
Figura 2 -	Abordagem dos sete passos dos Pilares Técnicos do WCM.....	50
Figura 3 -	Matriz de correspondências no WCM.....	51
Figura 4 -	Estrutura do Pilar Manutenção Profissional dentro da abordagem dos sete passos de implementação.....	53
Figura 5 -	Relação entre eficácia das atividades de manutenção e o tempo de deterioramento do Equipamento.....	54
Figura 6 -	Visão sistemática do prolongamento da vida média de um componente.....	55
Figura 7 -	Exemplo de análise de custos de manutenção preventiva e priorização de atividades por meio de gráfico do tipo pareto.....	55
Figura 8 -	Comportamento das curvas de solicitação de trabalho e de solicitação prevista ao projeto para um componente, em termos de stress.....	56
Figura 9 -	Visão esquemática do aumento da robustez do componente, por meio do aumento da solicitação prevista a projeto (melhoramento focalizado sobre o componente).....	57
Figura 10 -	Visão esquemática do fortalecimento do processo, por meio da redução da solicitação média de trabalho sobre o componente (melhoramento focalizado no processo).....	57
Figura 11 -	Estrutura metalúrgica dos aços ferro-cromo.....	67
Figura 12 -	Região do eutetóide do diagrama de fases Fe-Fe ₃ C.....	69
Figura 13 -	Versão modificada do diagrama ferro-carbono.....	70
Figura 14 -	Microestrutura de um aço bifásico com ilhas de martensita finas em uma matriz de ferrita (aumento original de 2500 ^X).....	71
Figura 15 -	Efeito da temperatura de revenido nas propriedades do aço.....	73
Figura 16 -	Fluxograma de rotas para fabricação de produtos metálicos.....	76
Figura 17 -	Representação esquemática do processo de usinagem.....	78
Figura 18 -	Representação esquemática das condições de corte do processo de usinagem.....	79
Figura 19 -	Processo de brasagem.....	80

Figura 20 -	Representação esquemática do processo de eletrodeposição.....	82
Figura 21 -	Master Plan do Projeto.....	94
Figura 22 -	Separação dos corpos de prova utilizados nas análises de espectrometria por emissão óptica dos materiais do protótipo: (a) Amostra em formato de chapa; (b) Amostra em formato cilíndrico.....	106
Figura 23 -	Separação dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração dos materiais do protótipo: (a) Amostras em formato de chapa; (b) Amostras em formato cilíndrico.....	108
Figura 24 -	Inserção de parâmetros dos ensaios de tração nos softwares Mattest Automação Tesc® Versão 3.04 e VirMaq® e Versão 3.04: (a) Software Mattest Automação Tesc Versão 3.04; (b) Software Mattest Automação VirMaq Versão 3.04.....	109
Figura 25 -	Execução de ensaios de tração dos materiais do protótipo: (a) Amostras em formato de chapa; (b) Amostras em formato cilíndrico.....	110
Figura 26 -	Plano sistêmico de suporte às execuções das atividades de análise estrutural.....	113
Figura 27 -	Escala de qualidade dos parâmetros de malha “Skewness” e “Orthogonal Quality”.....	115
Figura 28 -	Curva de estimativa de tempo de vida útil em termos de ciclos de tensão alternada para o material da haste de acionamento do dispositivo original.....	117
Figura 29 -	Curva de estimativa de tempo de vida útil em termos de ciclos de tensão alternada para o material da base do dispositivo original...	120
Figura 30 -	Separação dos corpos de prova utilizados nas análises de espectrometria por emissão óptica dos materiais do dispositivo desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico: (a) Amostra em formato de chapa; (b) Amostra em formato cilíndrico.....	142

Figura 31 -	Separação dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração dos materiais do dispositivo desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico: (a) Amostras em formato de chapa; (b) Amostras em formato cilíndrico.....	145
Figura 32 -	Componentes que apresentaram falhas mecânicas após o processo de dobramento: (a) Chapa da base do dispositivo antes do processo de dobramento; (b) Chapa da base do dispositivo após o processo de dobramento.....	147
Figura 33 -	Certificado de qualidade dos materiais em formato de chapa, utilizado para a fabricação do dispositivo desenvolvido.....	148
Figura 34 -	Visão geral de uso do software Map Steel MUCG83®: (a) Tela inicial do software; (b) Inserção dos teores percentuais de cada elemento químico do material; (c) Processamento de dados pelo algoritmo do software; (d) Resultados obtidos pelo software.....	148
Figura 35 -	Separação dos corpos de prova utilizados nas análises de espectrometria por emissão óptica dos materiais do dispositivo desenvolvido, com aplicação do tratamento térmico: (a) Amostra em formato de chapa; (b) Amostra em formato cilíndrico.....	152
Figura 36 -	Separação dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração dos materiais do dispositivo desenvolvido, com a aplicação do tratamento térmico: (a) Amostras em formato de chapa; (b) Amostras em formato cilíndrico.....	154
Figura 37 -	Curva de estimativa de tempo de vida útil em termos de ciclos de tensão alternada para o material da haste de acionamento do dispositivo desenvolvido.....	161
Figura 38 -	Micrografia do material metálico do dispositivo de extração original.....	187
Figura 39 -	Micrografia dos materiais metálicos em formato de chapa do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido: (a) Ampliação em 5 X; (b) Ampliação em 10X; (c) Ampliação em 20X; (d) Ampliação em 50X.....	188

Figura 40 -	Micrografia dos materiais metálicos em formato cilíndrico do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido: (a) Reativo sem ataque e ampliação em 100 X: Presença de inclusões; (b) Reativo Kalling's e ampliação em 100X: Austenita; (c) Reativo Kalling's e ampliação em 200X: Austenita; (d) Reativo Kalling's e ampliação em 1.000X: Detalhe dos grãos de austenita.....	189
Figura 41 -	Micrografia dos materiais metálicos em formato de chapa do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico: (a) Reativo Vilella e ampliação em 100X: Martensita; (b) Reativo Vilella e ampliação em 200X: Martensita; (c) e (d): Reativo Vilella e ampliação em 1.000X: Detalhe da martensita e carbonetos esferoidizados.....	190
Figura 42 -	Micrografia dos materiais metálicos em formato cilíndrico do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico: (a) Reativo sem ataque e ampliação em 100 X: Presença de inclusões; (b) Reativo Vilella e ampliação em 100X: Ferrita e carbonetos esferoidizados; (c) Reativo Vilella e ampliação em 200X: Ferrita e carbonetos esferoidizados; (d): Reativo Vilella e ampliação em 1.000X: Detalhe da ferrita e carbonetos esferoidizados.....	191
Figura 43 -	Micrografia dos materiais metálicos em formato de chapa do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido, com a aplicação do tratamento térmico: (a) Reativo Vilella e ampliação em 200X: Ferrita e carbonetos esferoidizados; (b) Reativo Vilella e ampliação em 1.000X: Detalhe da ferrita e carbonetos esferoidizados.....	192

Figura 44 -	Micrografia dos materiais metálicos em formato cilíndrico do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido, com a aplicação do tratamento térmico: (a) Reativo sem ataque e ampliação em 100 X: Presença de inclusões; (b) Reativo Vilella e ampliação em 100X: Ferrita e carbonetos esferoidizados; (c) Reativo Vilella e ampliação em 200X: Ferrita e carbonetos esferoidizados; (d): Reativo Vilella e ampliação em 1.000X: Detalhe da ferrita e carbonetos esferoidizados.....	193
Figura 45 -	Comportamento das curvas tração-deformação dos materiais em formato de chapa do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido, gerados pelo software Mattest Automação Tesc® Versão 3.04.....	197
Figura 46 -	Comportamento das curvas tração-deformação dos materiais em formato cilíndrico do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido, gerados pelo software Mattest Automação Tesc® Versão 3.04.....	198
Figura 47 -	Comportamento das curvas tração-deformação dos materiais em formato de chapa do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem aplicação do tratamento térmico, gerados pelo software Mattest Automação Tesc® Versão 3.04.....	199
Figura 48 -	Comportamento das curvas tração-deformação dos materiais em formato cilíndrico do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem aplicação do tratamento térmico, gerados pelo software Mattest Automação Tesc® Versão 3.04.....	200
Figura 49 -	Comportamento das curvas tração-deformação dos materiais em formato de chapa do dispositivo de extração desenvolvido, com aplicação do tratamento térmico, gerados pelo software Mattest Automação Tesc® Versão 3.04.....	202
Figura 50 -	Comportamento das curvas tração-deformação dos materiais em formato cilíndrico do dispositivo de extração desenvolvido, com aplicação do tratamento térmico, gerados pelo software Mattest Automação Tesc® Versão 3.04.....	202

Figura 51 -	Curva de estimativa de vida útil (número de ciclos) da haste de acionamento do dispositivo original em relação ao seu desgaste...	206
Figura 52 -	Curva de estimativa de vida útil (número de dias) da haste de acionamento do dispositivo original em relação ao seu desgaste...	206
Figura 53 -	Curva de estimativa de vida útil (número de ciclos) da haste de acionamento do dispositivo desenvolvido em relação ao seu desgaste, considerando a máquina em funcionamento sete dias por semana.....	209
Figura 54 -	Curva de estimativa de vida útil (número de ciclos) da haste de acionamento do dispositivo desenvolvido em relação ao seu desgaste, considerando a máquina em funcionamento seis dias por semana.....	209
Figura 55 -	Curva de estimativa de vida útil (número de ciclos) da pastilha do dispositivo original em relação ao seu desgaste.....	212
Figura 56 -	Curva de estimativa de vida útil (número de dias) da pastilha do dispositivo desenvolvido em relação ao seu desgaste, considerando um desgaste máximo admissível de cinco milímetros.....	214
Figura 57 -	Curva de estimativa de vida útil (número de ciclos) da pastilha do dispositivo desenvolvido em relação ao seu desgaste, considerando um desgaste máximo admissível de cinco milímetros.....	214
Figura 58 -	Curva de estimativa de vida útil (número de dias) da pastilha do dispositivo desenvolvido em relação ao seu desgaste, considerando um desgaste máximo admissível de três milímetros.	215
Figura 59 -	Curva de estimativa de vida útil (número de dias) da pastilha do dispositivo desenvolvido em relação ao seu desgaste, considerando um desgaste máximo admissível de três milímetros.	215
Figura 60 -	Curva de estimativa de vida útil (número de dias) da base do dispositivo desenvolvido em relação ao seu desgaste, considerando um desgaste máximo admissível de meio milímetro	217

- Figura 61 - Curva de estimativa de vida útil (número de ciclos) da base do dispositivo desenvolvido em relação ao seu desgaste, considerando um desgaste máximo admissível de meio milímetro 217
- Figura 62 - Curva de estimativa de vida útil (número de dias) da base do dispositivo desenvolvido em relação ao seu desgaste, considerando um desgaste máximo admissível de meio milímetro 219
- Figura 63 - Curva de estimativa de vida útil (número de ciclos) da base do dispositivo desenvolvido em relação ao seu desgaste, considerando um desgaste máximo admissível de meio milímetro 219

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Pilares Técnicos da Estrutura do WCM.....	50
Tabela 2 -	Pilares Gerenciais da Estrutura do WCM.....	51
Tabela 3 -	Composição típica de aços inoxidáveis austeníticos.....	63
Tabela 4 -	Composição típica de aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos.	66
Tabela 5 -	Coeficiente H ou severidade de têmpera para diversos meios de resfriamento.....	74
Tabela 6 -	Reações nos apoios A e B com suas respectivas equações simplificadas.....	91
Tabela 7 -	Reações nos apoios A e B com suas respectivas equações simplificadas.....	92
Tabela 8 -	Fluxo de Ações do Desenvolvimento do Protótipo.....	95
Tabela 9 -	Fluxo de Ações do Desenvolvimento da Versão Final do Dispositivo.....	96
Tabela 10 -	Especificações dos materiais utilizados na fabricação dos protótipos.....	97
Tabela 11 -	Aparelhagem necessária à execução da primeira análise de espectrometria por emissão óptica dos materiais do dispositivo original.....	99
Tabela 12 -	Identificação dos corpos de prova utilizados nas análises para identificação de materiais do dispositivo de extração original.....	99
Tabela 13 -	Aparelhagem necessária à execução da análise de contra prova de espectrometria por emissão óptica dos materiais do dispositivo original.....	100
Tabela 14 -	Aparelhagem necessária à execução das análises de caracterização microestrutural dos materiais do dispositivo original.....	101
Tabela 15 -	Aparelhagem necessária à execução de análises de dureza dos materiais do dispositivo original.....	103
Tabela 16 -	Aparelhagem necessária à execução da análise de espectrometria por emissão óptica dos materiais do protótipo.....	105

Tabela 17 -	Identificação dos corpos de prova utilizados nas análises de espectrometria por emissão óptica dos materiais do protótipo.....	106
Tabela 18 -	Identificação dos corpos de prova utilizados nas análises de caracterização microestrutural dos materiais do protótipo.....	107
Tabela 19 -	Aparelhagem necessária à execução do ensaio de tração dos materiais do protótipo.....	109
Tabela 20 -	Identificação dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração dos materiais do protótipo.....	109
Tabela 21 -	Aparelhagem necessária à execução de análises de dureza dos materiais do protótipo.....	111
Tabela 22 -	Identificação dos corpos de prova utilizados nas análises de dureza dos materiais do protótipo.....	111
Tabela 23 -	Nomenclaturas das fichas técnicas de dispositivo original, elaboradas a partir da metodologia de Engenharia Reversa.....	112
Tabela 24 -	Métricas de malha utilizadas na análise estrutural do conjunto extrator do dispositivo original.....	116
Tabela 25 -	Métricas de malha utilizadas na análise estrutural da haste de acionamento do dispositivo original.....	118
Tabela 26 -	Métricas de malha utilizadas na análise estrutural da mola principal do dispositivo original.....	119
Tabela 27 -	Métricas de malha utilizadas na análise estrutural da base do dispositivo original.....	121
Tabela 28 -	Especificação de ferramentas e “gabaritos” de fabricação necessárias às execuções dos processos de corte, fixação, dobramento e furação envolvidos no desenvolvimento da base do protótipo.....	122
Tabela 29 -	Especificação de ferramentas e “gabaritos” de fabricação necessárias às execuções dos processos de corte, fixação, dobramento, furação e brasagem envolvidos no desenvolvimento da haste de acionamento do protótipo.....	123

Tabela 30 -	Especificação de ferramentas e “gabaritos” de fabricação necessárias às execuções dos processos de dobramento e brasagem envolvidos no desenvolvimento do conjunto extrator do protótipo.....	123
Tabela 31 -	Especificação de ferramentas e “gabaritos” de fabricação necessárias às execuções dos processos de corte e dobramento envolvidos no desenvolvimento da haste de transmissão do protótipo.....	124
Tabela 32 -	Instrumentos de precisão utilizados na conferência de medidas durante a fabricação dos componentes do protótipo.....	124
Tabela 33 -	Aparelhagem necessária à execução da fabricação da base do protótipo, “gabaritos” e ferramentas de fabricação necessárias às execuções dos processos de corte, fixação, dobramento e furação envolvidos.....	125
Tabela 34 -	Aparelhagem necessária à execução da fabricação da haste de acionamento do protótipo, “gabaritos” e ferramentas de fabricação necessárias às execuções dos processos de corte, fixação, dobramento, furação e brasagem envolvidos.....	126
Tabela 35 -	Aparelhagem necessária à execução da fabricação do conjunto extrator do protótipo, “gabaritos” e ferramentas de fabricação necessárias às execuções dos processos de processos de dobramento e brasagem envolvidos.....	127
Tabela 36 -	Aparelhagem necessária à execução da fabricação do eixo do conjunto extrator do protótipo.....	129
Tabela 37 -	Aparelhagem necessária à execução da fabricação dos pinos de fixação da estrutura do protótipo.....	130
Tabela 38 -	Aparelhagem necessária à execução da fabricação da haste de acionamento do protótipo, “gabaritos” e ferramentas de fabricação necessárias às execuções corte e dobramento envolvidos.....	131
Tabela 39 -	Especificações das condições operacionais do processo de tratamento superficial do protótipo.....	132

Tabela 40 -	Aparelhagem necessária à aplicação processo de tratamento superficial.....	136
Tabela 41 -	Posicionamento inicial de protótipos e dispositivos originais em barra extratora selecionada.....	138
Tabela 42 -	Posicionamento final de protótipos e dispositivos originais em barra extratora para o acompanhamento e análise de critérios de performance e tempo de vida útil.....	139
Tabela 43 -	Especificações dos materiais utilizados na fabricação na versão final do dispositivo desenvolvido.....	141
Tabela 44 -	Identificação dos corpos de prova utilizados nas análises de espectrometria por emissão óptica dos materiais do dispositivo desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico.....	143
Tabela 45 -	Identificação dos corpos de prova utilizados nas análises de caracterização microestrutural dos materiais do dispositivo desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico.....	144
Tabela 46 -	Identificação dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração dos materiais do dispositivo desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico.....	145
Tabela 47 -	Identificação dos corpos de prova utilizados nos ensaios de dureza dos materiais do dispositivo desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico.....	146
Tabela 48 -	Sequência térmica de recozimento aplicada aos materiais em formato de chapa, utilizado para a fabricação do dispositivo desenvolvido.....	149
Tabela 49 -	Aparelhagem necessária à execução da aplicação do processo de tratamento térmico.....	149
Tabela 50 -	Aparelhagem necessária à execução do ensaio não destrutivo de inspeção por líquido penetrante.....	150
Tabela 51 -	Identificação dos corpos de prova utilizados nas análises de espectrometria por emissão óptica dos materiais do dispositivo desenvolvido, com aplicação do tratamento térmico.....	152

Tabela 52 -	Identificação dos corpos de prova utilizados nas análises de caracterização microestrutural dos materiais do dispositivo desenvolvido, com aplicação do tratamento térmico.....	153
Tabela 53 -	Identificação dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração dos materiais do dispositivo desenvolvido, com a aplicação do tratamento térmico.....	155
Tabela 54 -	Identificação dos corpos de prova utilizados nos ensaios de dureza dos materiais do dispositivo desenvolvido, com a aplicação do tratamento térmico.....	156
Tabela 55 -	Nomenclaturas das fichas técnicas de dispositivo desenvolvido, elaboradas a partir das reinspeções de cotas constantes nos dispositivos.....	157
Tabela 56 -	Métricas de malha utilizadas na análise estrutural do conjunto extrator do dispositivo desenvolvido.....	158
Tabela 57 -	Métricas de malha utilizadas na análise estrutural da haste de acionamento redimensionada do dispositivo desenvolvido.....	160
Tabela 58 -	Métricas de malha utilizadas na análise estrutural da haste de acionamento do dispositivo desenvolvido, considerando o raio de curvatura original.....	162
Tabela 59 -	Métricas de malha utilizadas na análise estrutural da haste de acionamento do dispositivo desenvolvido, considerando o raio de curvatura modificado.....	163
Tabela 60 -	Métricas de malha utilizadas na análise estrutural da mola principal do dispositivo desenvolvido.....	164
Tabela 61 -	Especificação das matrizes de conformação mecânica necessárias às execuções dos processos de fixação, dobramento e abaulamento envolvidos no desenvolvimento da base do novo dispositivo em sua versão final.....	166
Tabela 62 -	Especificação das matrizes de conformação mecânica necessárias às execuções dos processos de corte, fixação, dobramento, furação e brasagem envolvidos no desenvolvimento da haste de acionamento do novo dispositivo em sua versão final.....	167

Tabela 63 -	Especificação da matriz de conformação mecânica necessária às execuções dos processos de dobramento e brasagem envolvidos no desenvolvimento do conjunto extrator do novo dispositivo em sua versão final.....	168
Tabela 64 -	Especificação da matriz de conformação mecânica necessária às execuções dos processos de corte e dobramento envolvidos no desenvolvimento da haste de transmissão do novo dispositivo em sua versão final.....	168
Tabela 65 -	Nomenclaturas dos elementos componentes da matriz de conformação mecânica necessária à execução do dobramento da chapa da base.....	169
Tabela 66 -	Nomenclaturas dos elementos componentes da matriz de conformação mecânica necessária à execução do suporte e fixação do processo de dobramento da chapa da base.....	170
Tabela 67 -	Nomenclaturas dos elementos componentes da matriz de conformação mecânica necessária à execução do perfil abaulado da ponta da base.....	170
Tabela 68 -	Nomenclaturas dos elementos componentes da matriz de conformação mecânica necessária à execução da fixação e posicionamento da arame principal da haste de acionamento.....	171
Tabela 69 -	Nomenclaturas dos elementos componentes da matriz de conformação mecânica necessária à execução do dobramento do arame principal da haste de acionamento.....	171
Tabela 70 -	Nomenclaturas dos elementos componentes da matriz de conformação mecânica necessária à fixação e posicionamento da haste de acionamento dobrada e seu pino articulado.....	172
Tabela 71 -	Nomenclaturas dos elementos componentes da matriz de conformação mecânica necessária ao posicionamento e conexão da haste de articulação.....	172
Tabela 72 -	Nomenclaturas dos elementos componentes da matriz de conformação mecânica necessária à execução do dobramento da chapa de articulação do conjunto extrator.....	173

Tabela 73 -	Nomenclaturas dos elementos componentes das matrizes de conformação mecânica necessárias à execução da fixação e posicionamento da cabeça e chapa de articulação e fixação e posicionamento da cabeça do conjunto extrator.....	173
Tabela 74 -	Nomenclaturas dos elementos componentes da matriz de conformação mecânica necessária ao posicionamento e dobramento do arame da haste de transmissão cortado.....	174
Tabela 75 -	Aparelhagem necessária à execução da fabricação da base do dispositivo desenvolvido, assim como das matrizes de conformação mecânica necessárias às execuções dos processos de fixação, dobramento e abaulamento envolvidos.....	175
Tabela 76 -	Aparelhagem necessária à execução da fabricação da haste de acionamento do dispositivo desenvolvido, assim como das matrizes de conformação mecânica necessárias às execuções dos processos de corte, fixação, dobramento, furação e brasagem envolvidos.....	176
Tabela 77 -	Aparelhagem necessária à execução da fabricação do conjunto extrator do dispositivo desenvolvido, assim como das matrizes de conformação mecânica necessárias às execuções dos processos de dobramento e brasagem envolvidos.....	177
Tabela 78 -	Aparelhagem necessária à execução da fabricação da haste de acionamento do dispositivo desenvolvido, assim como da matriz de conformação mecânica necessária às execuções dos processos de corte e dobramento envolvidos.....	179
Tabela 79 -	Resultados da primeira análise de espectrometria de emissão óptica dos materiais do dispositivo de extração original.....	181
Tabela 80 -	Resultados da análise de contra prova de espectrometria de emissão óptica dos materiais do dispositivo de extração original..	182
Tabela 81 -	Resultados da análise de espectrometria de emissão óptica dos materiais do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido...	183

Tabela 82 -	Resultados da análise de espectrometria de emissão óptica dos materiais do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico.....	184
Tabela 83 -	Resultados da análise de espectrometria de emissão óptica dos materiais do dispositivo de extração desenvolvido, com a aplicação do tratamento térmico.....	186
Tabela 84 -	Resultados das análises de dureza dos materiais do dispositivo de extração original.....	194
Tabela 85 -	Resultados das análises de dureza dos materiais do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido.....	194
Tabela 86 -	Resultados das análises de dureza dos materiais do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem aplicação do tratamento térmico.....	195
Tabela 87 -	Resultados das análises de dureza dos materiais do dispositivo de extração desenvolvido, com aplicação do tratamento térmico.....	196
Tabela 88 -	Resultados dos ensaios de tração dos materiais do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido.....	197
Tabela 89 -	Resultados dos ensaios de tração dos materiais do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem aplicação do tratamento térmico.....	199
Tabela 90 -	Resultados dos ensaios de tração dos materiais do dispositivo de extração desenvolvido, com aplicação do tratamento térmico.....	201
Tabela 91 -	Resultados ensaios dimensionais executados na mola principal do dispositivo de extração desenvolvido.....	210
Tabela 92 -	Resultados da análise de composição química do material utilizado na mola principal do dispositivo de extração desenvolvido.....	211
Tabela 93 -	Valores de dureza obtidos após a aplicação do processo de tratamento térmico nos componentes em formato de chapa do dispositivo de extração desenvolvido obtidos a partir da submissão dos mesmos à sequências térmicas de recozimento.....	222

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>A</i>	Área de Impressão Deixada no Corpo Ensaiado
<i>AA</i>	Autonomous Activities
<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>A_c</i>	Área de Contato Aparente entre a Pastilha e o Palito
<i>Ah</i>	Ampere-hora
<i>AHQP</i>	Alocation of Highly Qualified People
<i>AISI</i>	American Iron and Steel Institute
<i>AM</i>	Autonomous Maintenance
<i>ASME</i>	American Society of Mechanical Engineers
<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials
<i>A/dm²</i>	Ampere por Decímetro Quadrado
<i>B</i>	Boro
<i>BDM</i>	Breakdown Maintenance
<i>C</i>	Carbono
<i>CAD</i>	Desenho Assistido por Computador
<i>CAE</i>	Engenharia Assistida por Computador
<i>CAM</i>	Manufatura Assistida por Computador
<i>CBM</i>	Conditions Based Maintenance
<i>CCC</i>	Estrutura Cúbica de Corpo Centrado
<i>CD</i>	Cost Deployment
<i>CEP</i>	Controle Estatístico de Processo
<i>CFC</i>	Estrutura Cúbica de Face Centrada
<i>CL</i>	Clarity of Objectives
<i>CM</i>	Commitment of Organization
<i>CNC</i>	Comando Numérico Computadorizado
<i>CP</i>	Competence of Organization
<i>Cr</i>	Cromo
<i>Cu</i>	Cobre
<i>Custo_{manutenção}</i>	Custo Total de Manutenção Preventiva
<i>Custo_{mat}</i>	Custo da Peça de Reposição
<i>Custo_{Mdo}</i>	Custo da mão-de-obra

<i>d</i>	Profundidade do Desgaste da Pastilha
<i>D_e</i>	Diâmetro Médio da Espira da Mola Principal
<i>d_m</i>	Diâmetro do Fio utilizado na Mola Principal
<i>d₁</i>	Diagonal formada pelos Vértices Opostos da Base da Pirâmide
<i>d₂</i>	Diagonal formada pelos Vértices Opostos da Base da Pirâmide
<i>E</i>	Módulo de Elasticidade do Material
<i>EEM</i>	Early Equipment Management
<i>EIA</i>	Associação de Indústrias Eletrônicas
<i>ENV</i>	Environment
<i>EPI</i>	Equipamento de Proteção Individual
<i>F_a</i>	Carga Aplicada
<i>F_i</i>	Força de Impacto
<i>Fe₃C</i>	Cementita
<i>Fe-C</i>	Ferro-Carbono
<i>Fe-Cr</i>	Ferro-Cromo
<i>Fe-Cr-Ni</i>	Ferro-Cromo-Níquel
<i>Fe_α</i>	Ferro-Alfa
<i>Fe_γ</i>	Ferro-Gama
<i>FI</i>	Focused Improvement
<i>F_n</i>	Força Normal Aplicada
<i>FS</i>	Fator de Segurança
<i>F_{ac}</i>	Força de Acionamento da Haste
<i>F_m</i>	Força Exercida pela Mola Principal
<i>F_l</i>	Força Exercida pela Haste de Transmissão
<i>G</i>	Módulo de Cisalhamento do Material
<i>g/cm³</i>	Gramas por Centímetro Cúbico
<i>g/l</i>	Gramas por Litro
<i>GPa</i>	Gigapascals
<i>H</i>	Dureza Absoluta do Material do Palito
<i>H_a</i>	Dureza do Abrasivo
<i>H_t</i>	Coefficiente de Transferência de Calor da Têmpera em Óleo
<i>Hh</i>	Tempo de execução da Atividade
<i>HRC</i>	Dureza Rockwell C

<i>HSS</i>	High Stainless Steel
<i>HV</i>	Dureza Vickers
<i>Hz</i>	Hertz
<i>I</i>	Impacto
<i>ISO</i>	International Organization for Standardization
<i>JIT</i>	Just In Time
<i>K_d</i>	Coefficiente de Desgaste do Material
<i>K</i>	Constante Elástica da Mola Principal
<i>k_{1c}</i>	Concentração de Tensão
<i>Kg</i>	Quilogramas
<i>Kgf</i>	Quilograma-Força
<i>Kgf/cm²</i>	Quilograma-Força por Centímetro Quadrado
<i>Kgf/mm²</i>	Quilograma-Força por Milímetro Quadrado
<i>KN</i>	Quilo-Newtons
<i>KN/mm²</i>	Quilo-Newtons por Milímetro Quadrado
<i>kt</i>	Redução de Resistência a Fadiga
<i>L</i>	Comprimento do Deslizamento entre a Pastilha e o Palito
<i>LAMAT</i>	Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais
<i>LCS</i>	Logistics & Customer Service
<i>LD</i>	Level of Detail
<i>LE</i>	Level of Expansion
<i>m</i>	Massa do Componente
<i>m/s</i>	Metros por Segundo
<i>MC</i>	Management Commitment
<i>MEF</i>	Método dos Elementos Finitos
<i>ml/l</i>	Mililitros por Litro
<i>mm</i>	Milímetros
<i>mm²</i>	Milímetros Quadrados
<i>Mn</i>	Manganês
<i>MO</i>	Motivation of Operators
<i>Mo</i>	Molibdênio
<i>MOC</i>	Gerenciamento de Mudanças no Equipamento
<i>MPa</i>	Megapascals

<i>ms</i>	Milissegundos
<i>MTBF</i>	Mean Time Between Failures
<i>MTTr</i>	Tempo Médio de Reparo
<i>N</i>	Nitrogênio
<i>N</i>	Número de ciclos em relação às amplitudes de tensões aplicadas
<i>N</i>	Newtons
<i>Na</i>	Sódio
<i>N_a</i>	Número de Espiras Ativas da Mola Principal
<i>Ni</i>	Níquel
<i>Nr</i>	Quantidade de substituições do Componente no ano
<i>Pb</i>	Chumbo
<i>PCP</i>	Planejamento e Controle de Produção
<i>PD</i>	People Development
<i>PDCA</i>	Planejar - Fazer - Checar - Agir
<i>PM</i>	Professional Maintenance
<i>PP</i>	Polipropileno
<i>PVC</i>	Policloreto de Vinila
<i>QC</i>	Quality Control
<i>R</i>	Raio da Haste de Acionamento
<i>RM</i>	Rout Map of WCM
<i>Saf</i>	Safety
<i>S</i>	Enxofre
<i>S</i>	Tensões Aplicadas
<i>Si</i>	Silício
<i>Sn</i>	Estanho
<i>Sr</i>	Tensão de Ruptura
<i>S_y</i>	Tensão de Escoamento
<i>TB</i>	Time & Budget
<i>TBM</i>	Time Based Maintenance
<i>TBr</i>	Tempo entre Substituições
<i>T_c</i>	Tempo do Choque ou Contato Estimado
<i>Ti</i>	Titânio
<i>TIE</i>	Total Industrial Engineering

<i>TPM</i>	Total Productive Maintenance
<i>TQC</i>	Total Quality Control
<i>TTT</i>	Curvas de Transformação Tempo-Temperatura
<i>UC</i>	Unidade de Controle
<i>U_o</i>	Velocidade de Contato
<i>UPD</i>	Unidade de Processamento de Dados
<i>v</i>	Velocidade de Impacto
<i>V</i>	Volume de Desgaste da Pastilha
<i>WCM</i>	World Class Manufacturing
<i>Zn</i>	Zinco
<i>%C_{aço}</i>	Teor de Carbono do Aço
<i>%C_{martensita}</i>	Porcentagem de Carbono da Martensita
<i>%γ</i>	Porcentagem de Fase Gama
<i>μm</i>	Micrometros
<i>°C</i>	Graus Celsius
<i>°C/s</i>	Graus Celsius por Segundo
<i>Δs</i>	Varição do Comprimento da Mola Principal

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Fase Ferrita
$\alpha\gamma$	Alfa-Gama
γ	Fase Austenita
ρ	Densidade ou Coeficiente de Poisson do Material

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	40
1.1	JUSTIFICATIVAS E NECESSIDADES PARA A REALIZAÇÃO DA PESQUISA.....	42
1.2	CONTEÚDO DA TESE.....	43
2	OBJETIVOS.....	45
2.1	OBJETIVO GERAL.....	45
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	45
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	47
3.1	SISTEMA DE PRODUÇÃO.....	47
3.2	METODOLOGIA WCM.....	47
3.2.1	Objetivo do WCM.....	48
3.2.2	Princípios Básicos do WCM.....	48
3.2.3	Estrutura do WCM.....	49
3.2.4	Métodos e Ferramentas do WCM.....	51
3.3	PILAR PROFESSIONAL MAINTENANCE (PM).....	52
3.3.1	Objetivos do Pilar Professional Maintenance.....	52
3.3.2	Estrutura do Pilar Professional Maintenance.....	53
3.3.3	O Quarto Passo de Implementação do Pilar Professional Maintenance.....	54
3.4	AÇOS.....	58
3.4.1	Aços Inoxidáveis.....	59
3.4.1.1	Aços Inoxidáveis Austeníticos.....	62
3.4.1.2	Aços Inoxidáveis Ferríticos e Martensíticos.....	65
3.4.2	Transformações de Fases nos Aços.....	69
3.4.3	Tratamentos Térmicos de Aços.....	70
3.4.3.1	Tratamento Térmico de Aços Bifásicos.....	71
3.4.3.2	Têmpera e Revenido.....	72
3.4.3.3	Severidade da Têmpera.....	73
3.5	ESPECIFICAÇÃO DE PRODUTO E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO.....	75
3.5.1	Operações de Conformação.....	76

3.5.2	Usinagem.....	77
3.5.3	Soldagem.....	79
3.5.3.1	Brasagem.....	80
3.6	CORROSÃO E PREVENÇÃO.....	81
3.6.1	Eletrodeposição.....	82
3.6.1.1	Eletrodeposição de Níquel.....	83
3.7	METODOLOGIA DO PROJETO DE ENGENHARIA REVERSA.....	83
3.8	METODOLOGIA DE PROJETO DE ANÁLISE ESTRUTURAL.....	84
3.8.1	Análise Estrutural do Conjunto Extrator.....	84
3.8.2	Análise Estrutural da Haste de Acionamento.....	85
3.8.3	Análise Estrutural da Mola Principal.....	87
3.8.4	Análise Estrutural da Pastilha.....	88
3.8.5	Análise Estrutural da Base.....	89
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	94
4.1	ESTRATÉGIA E GOVERNANÇA DO PROJETO.....	94
4.2	ESPECIFICAÇÕES DOS MATERIAIS DO DISPOSITIVO DE EXTRAÇÃO ORIGINAL E PROTÓTIPO.....	97
4.3	ANÁLISES PARA IDENTIFICAÇÃO DE MATERIAIS DO DISPOSITIVO DE EXTRAÇÃO ORIGINAL.....	98
4.3.1	Análises de Espectrometria por Emissão Óptica.....	98
4.3.1.1	Normas de Referência e Documentos Complementares.....	98
4.3.1.2	Aparelhagem Empregada na Primeira Análise.....	99
4.3.1.3	Preparação dos Corpos de Prova da Primeira Análise.....	99
4.3.1.4	Procedimento da Primeira Análise.....	99
4.3.1.5	Aparelhagem Empregada na Análise de Contra Prova.....	100
4.3.1.6	Preparação dos Corpos de Prova da Análise de Contra Prova.....	100
4.3.1.7	Procedimento da Análise de Contra Prova.....	100
4.3.2	Caracterização Microestrutural.....	101
4.3.2.1	Normas de Referência e Documentos Complementares.....	101
4.3.2.2	Aparelhagem.....	101
4.3.2.3	Preparação dos Corpos de Prova.....	102

4.3.2.4	Procedimento.....	102
4.3.3	Análises de Dureza.....	103
4.3.3.1	Normas de Referência e Documentos Complementares.....	103
4.3.3.2	Aparelhagem.....	103
4.3.3.3	Preparação dos Corpos de Prova.....	103
4.3.3.4	Procedimento para Análise de Dureza Vickers.....	104
4.3.3.5	Procedimento para Análise de Dureza Rockwell C.....	104
4.4	ANÁLISES DE ESPECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS DO PROTÓTIPO DO DISPOSITIVO DE EXTRAÇÃO DESENVOLVIDO.....	104
4.4.1	Análises de Espectrometria por Emissão Óptica.....	105
4.4.1.1	Normas de Referência e Documentos Complementares.....	105
4.4.1.2	Aparelhagem.....	105
4.4.1.3	Preparação dos Corpos de Prova.....	105
4.4.1.4	Procedimento.....	106
4.4.2	Caracterização Microestrutural.....	106
4.4.2.1	Normas de Referência e Documentos Complementares.....	106
4.4.2.2	Aparelhagem.....	107
4.4.2.3	Preparação dos Corpos de Prova.....	107
4.4.2.4	Procedimento.....	107
4.4.3	Ensaio de Tração.....	107
4.4.3.1	Normas de Referência e Documentos Complementares.....	108
4.4.3.2	Aparelhagem.....	108
4.4.3.3	Preparação dos Corpos de Prova.....	108
4.4.3.4	Procedimento.....	109
4.4.4	Análises de Dureza.....	110
4.4.4.1	Normas de Referência e Documentos Complementares.....	110
4.4.4.2	Aparelhagem.....	111
4.4.4.3	Preparação dos Corpos de Prova.....	111
4.4.4.4	Procedimento.....	111
4.5	METODOLOGIA DO PROJETO DE ENGENHARIA REVERSA DO DISPOSITIVO ORIGINAL.....	112

4.6	PLANO SISTÊMICO DE EXECUÇÃO DAS ANÁLISES ESTRUTURAIS DO DISPOSITIVO ORIGINAL.....	113
4.6.1	Análise Estrutural do Conjunto Extrator do Dispositivo Original.....	116
4.6.2	Análise Estrutural da Haste de Acionamento do Dispositivo Original.....	116
4.6.3	Análise Estrutural da Mola Principal do Dispositivo Original	119
4.6.4	Análise Estrutural da Pastilha do Dispositivo Original.....	120
4.6.5	Análise Estrutural da Base do Dispositivo Original.....	120
4.7	DESENVOLVIMENTO DOS PROTÓTIPOS.....	121
4.7.1	Desenvolvimento da Base.....	122
4.7.2	Desenvolvimento da Haste de Acionamento.....	122
4.7.3	Desenvolvimento do Conjunto Extrator.....	123
4.7.4	Desenvolvimento do Eixo do Conjunto Extrator.....	123
4.7.5	Desenvolvimento dos Pinos de Fixação da Estrutura.....	123
4.7.6	Desenvolvimento da Haste de Transmissão.....	124
4.8	FABRICAÇÃO DOS PROTÓTIPOS.....	124
4.8.1	Fabricação da Base.....	125
4.8.1.1	Aparelhagem.....	125
4.8.1.2	Procedimento.....	125
4.8.2	Fabricação da Haste de Acionamento.....	126
4.8.2.1	Aparelhagem.....	126
4.8.2.2	Procedimento.....	127
4.8.3	Fabricação do Conjunto Extrator.....	127
4.8.3.1	Aparelhagem.....	127
4.8.3.2	Procedimento.....	128
4.8.4	Fabricação do Eixo do Conjunto Extrator.....	128
4.8.4.1	Aparelhagem.....	129
4.8.4.2	Procedimento.....	129
4.8.5	Fabricação dos Pinos de Fixação da Estrutura.....	129
4.8.5.1	Aparelhagem.....	129
4.8.5.2	Procedimento.....	130
4.8.6	Fabricação da Haste de Transmissão.....	130

4.8.6.1	Aparelhagem.....	130
4.8.6.2	Procedimento.....	131
4.9	DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE TRATAMENTO SUPERFICIAL.....	131
4.9.1	Dados Operacionais do Processo.....	132
4.9.2	Montagem do Banho.....	135
4.9.3	Aplicação do Processo de Tratamento Superficial.....	135
4.9.3.1	Aparelhagem.....	136
4.9.3.2	Procedimento.....	136
4.10	PROPOSTA DE GERENCIAMENTO DE MUDANÇAS NO EQUIPAMENTO (MOC).....	137
4.11	ANÁLISES DE DESIGN HIGIÊNICO.....	137
4.12	TESTES DOS PROTÓTIPOS EM CAMPO.....	137
4.12.1	Instalação dos Protótipos no Equipamento.....	138
4.12.2	Acompanhamento e Análise de Critérios de Performance e Tempo de Vida Útil.....	140
4.13	Validação dos Protótipos.....	140
4.14	Especificações dos Materiais do Dispositivo de Extração Desenvolvido.....	141
4.15	Análises de Especificação dos Materiais do Dispositivo de Extração Desenvolvido sem aplicação do Tratamento Térmico.....	141
4.15.1	Análises de Espectrometria por Emissão Óptica.....	142
4.15.1.1	Normas de Referência e Documentos Complementares.....	142
4.15.1.2	Aparelhagem.....	142
4.15.1.3	Preparação dos Corpos de Prova.....	142
4.15.1.4	Procedimento.....	143
4.15.2	Caracterização Microestrutural.....	143
4.15.2.1	Normas de Referência e Documentos Complementares.....	143
4.15.2.2	Aparelhagem.....	143
4.15.2.3	Preparação dos Corpos de Prova.....	143
4.15.2.4	Procedimento.....	144
4.15.3	Ensaio de Tração.....	144

4.15.3.1	Normas de Referência e Documentos Complementares.....	144
4.15.3.2	Aparelhagem.....	144
4.15.3.3	Preparação dos Corpos de Prova.....	144
4.15.3.4	Procedimento.....	145
4.15.4	Análises de Dureza.....	146
4.15.4.1	Normas de Referência e Documentos Complementares.....	146
4.15.4.2	Aparelhagem.....	146
4.15.4.3	Preparação dos Corpos de Prova.....	146
4.15.4.4	Procedimento.....	146
4.16	DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE TRATAMENTO TÉRMICO.....	147
4.16.1	Aplicação do Processo de Tratamento Térmico.....	149
4.16.1.1	Aparelhagem.....	149
4.16.1.2	Procedimento.....	150
4.16.2	Inspeção por Líquido Penetrante.....	150
4.16.2.1	Aparelhagem.....	150
4.16.2.2	Procedimento.....	151
4.17	ANÁLISES DE ESPECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS DO DISPOSITIVO DE EXTRAÇÃO DESENVOLVIDO COM APLICAÇÃO DO TRATAMENTO TÉRMICO.....	151
4.17.1	Análises de Espectrometria por Emissão Óptica.....	151
4.17.1.1	Normas de Referência e Documentos Complementares.....	151
4.17.1.2	Aparelhagem.....	151
4.17.1.3	Preparação dos Corpos de Prova.....	152
4.17.1.4	Procedimento.....	152
4.17.2	Caracterização Microestrutural.....	153
4.17.2.1	Normas de Referência e Documentos Complementares.....	153
4.17.2.2	Aparelhagem.....	153
4.17.2.3	Preparação dos corpos de prova.....	153
4.17.2.4	Procedimento.....	153
4.17.3	Ensaio de Tração.....	154
4.17.3.1	Normas de Referência e Documentos Complementares.....	154
4.17.3.2	Aparelhagem.....	154

4.17.3.3	Preparação dos corpos de prova.....	154
4.17.3.4	Procedimento.....	155
4.17.4	Análises de Dureza.....	155
4.17.4.1	Normas de Referência e Documentos Complementares.....	155
4.17.4.2	Aparelhagem.....	155
4.17.4.3	Preparação dos Corpos de Prova.....	156
4.17.4.4	Procedimento.....	156
4.18	METODOLOGIA DO PROJETO DE ENGENHARIA REVERSA DO DISPOSITIVO DESENVOLVIDO.....	156
4.19	PLANO SISTÊMICO DE EXECUÇÃO DAS ANÁLISES ESTRUTURAIS DO DISPOSITIVO DESENVOLVIDO.....	157
4.19.1	Análise Estrutural do Conjunto Extrator do Dispositivo Desenvolvido.....	157
4.19.2	Redimensionamento da Haste de Acionamento do Dispositivo Original.....	158
4.19.3	Análise Estrutural da Haste de Acionamento do Dispositivo Desenvolvido.....	161
4.19.4	Análise Estrutural da Mola Principal do Dispositivo Desenvolvido.....	163
4.19.5	Análise Estrutural da Pastilha do Dispositivo Desenvolvido...	164
4.19.6	Análise Estrutural da Base do Dispositivo Desenvolvido.....	165
4.20	DESENVOLVIMENTO DO NOVO DISPOSITIVO.....	166
4.20.1	Desenvolvimento da Base.....	166
4.20.2	Desenvolvimento da Haste de Acionamento.....	167
4.20.3	Desenvolvimento do Conjunto Extrator.....	167
4.20.4	Desenvolvimento do Eixo do Conjunto Extrator.....	168
4.20.5	Desenvolvimento dos Pinos de Fixação da Estrutura.....	168
4.20.6	Desenvolvimento da Haste de Transmissão.....	168
4.20.7	Desenvolvimento das Matrizes de Conformação Mecânica....	169
4.20.7.1	Matrizes de Conformação Mecânica da Base.....	169
4.20.7.1.1	<i>Matriz de Dobramento.....</i>	169
4.20.7.1.2	<i>Matriz de Fixação.....</i>	169
4.20.7.1.3	<i>Matriz de Abaulamento.....</i>	170

4.20.7.2	Matrizes de Conformação Mecânica da Haste de Acionamento....	171
4.20.7.2.1	<i>Matriz de Fixação</i>	171
4.20.7.2.2	<i>Matriz de Dobramento</i>	171
4.20.7.2.3	<i>Matriz de Posicionamento</i>	172
4.20.7.2.4	<i>Matriz de Conexão</i>	172
4.20.7.3	Matrizes de Conformação Mecânica do Conjunto Extrator.....	173
4.20.7.3.1	<i>Matriz de Dobramento</i>	173
4.20.7.3.2	<i>Matrizes de Fixação e Posicionamento</i>	173
4.20.7.4	Matrizes de Conformação Mecânica da Haste de Transmissão.....	174
4.20.7.4.1	<i>Matriz de Posicionamento e Dobramento</i>	174
4.21	FABRICAÇÃO DO DISPOSITIVO DESENVOLVIDO.....	174
4.21.1	Fabricação da Base	174
4.21.1.1	Aparelhagem.....	175
4.21.1.2	Procedimento.....	175
4.21.2	Fabricação da Haste de Acionamento	176
4.21.2.1	Aparelhagem.....	176
4.21.2.2	Procedimento.....	177
4.21.3	Fabricação do Conjunto Extrator	177
4.21.3.1	Aparelhagem.....	177
4.21.3.2	Procedimento.....	178
4.21.4	Fabricação do Eixo do Conjunto Extrator	178
4.21.5	Fabricação dos Pinos de Fixação da Estrutura	178
4.21.6	Fabricação da Haste de Transmissão	179
4.21.6.1	Aparelhagem.....	179
4.21.6.2	Procedimento.....	179
4.22	DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE TRATAMENTO SUPERFICIAL.....	180
4.23	MONTAGEM DOS DISPOSITIVOS DESENVOLVIDOS.....	180
4.24	TESTES DOS DISPOSITIVOS DESENVOLVIDOS EM CAMPO E VALIDAÇÃO DO PROJETO.....	180
5	RESULTADOS	181
5.1	ANÁLISES DE ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓPTICA.	181

5.1.1	Análises de Espectrometria de Emissão Óptica dos Materiais do Dispositivo de Extração Original.....	181
5.1.2	Análises de Espectrometria de Emissão Óptica dos Materiais do Protótipo do Dispositivo de Extração Desenvolvido.....	183
5.1.3	Análises de Espectrometria de Emissão Óptica dos Materiais Dispositivo de Extração Desenvolvido sem aplicação do Tratamento Térmico.....	184
5.1.4	Análises de Espectrometria de Emissão Óptica dos Materiais Dispositivo de Extração Desenvolvido com aplicação do Tratamento Térmico.....	185
5.2	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL.....	186
5.2.1	Caracterização Microestrutural dos Materiais do Dispositivo de Extração Original.....	186
5.2.2	Caracterização Microestrutural dos Materiais do Protótipo do Dispositivo de Extração Desenvolvido.....	187
5.2.3	Caracterização Microestrutural dos Materiais do Dispositivo de Extração Desenvolvido sem aplicação do Tratamento Térmico.....	189
5.2.4	Caracterização Microestrutural dos Materiais do Dispositivo de Extração Desenvolvido com aplicação do Tratamento Térmico.....	191
5.3	ANÁLISES DE DUREZA.....	193
5.3.1	Análises de Dureza do Dispositivo de Extração Original.....	193
5.3.2	Análises de Dureza dos Materiais do Protótipo do Dispositivo de Extração Desenvolvido.....	194
5.3.3	Análises de Dureza dos Materiais do Dispositivo de Extração Desenvolvido sem aplicação do Tratamento Térmico.....	195
5.3.4	Análises de Dureza dos Materiais do Dispositivo de Extração Desenvolvido com aplicação do Tratamento Térmico.....	195
5.4	ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	196
5.4.1	Ensaio de Tração dos Materiais do Protótipo do Dispositivo de Extração Desenvolvido.....	196

5.4.2	Ensaio de Tração dos Materiais do Dispositivo de Extração Desenvolvido sem aplicação do Tratamento Térmico.....	198
5.4.3	Ensaio de Tração dos Materiais do Dispositivo de Extração Desenvolvido com aplicação do Tratamento Térmico.....	201
5.5	ANÁLISES ESTRUTURAIS DO DISPOSITIVO ORIGINAL E DO DISPOSITIVO DESENVOLVIDO.....	203
5.5.1	Análise Estrutural do Conjunto Extrator do Dispositivo Original.....	203
5.5.2	Análise Estrutural do Conjunto Extrator do Dispositivo Desenvolvido.....	204
5.5.3	Análise Estrutural da Haste de Acionamento do Dispositivo Original.....	204
5.5.4	Redimensionamento da Haste de Acionamento do Dispositivo Original.....	207
5.5.5	Análise Estrutural da Haste de Acionamento do Dispositivo Desenvolvido.....	207
5.5.6	Análise Estrutural da Mola Principal do Dispositivo Original.....	210
5.5.7	Análise Estrutural da Mola Principal do Dispositivo Desenvolvido.....	210
5.5.8	Análise Estrutural da Pastilha do Dispositivo Original.....	211
5.5.9	Análise Estrutural da Pastilha do Dispositivo Desenvolvido...	213
5.5.10	Análise Estrutural da Base do Dispositivo Original.....	216
5.5.11	Análise Estrutural da Base do Dispositivo Desenvolvido.....	217
5.6	TESTES DOS PROTÓTIPOS EM CAMPO.....	219
5.6.1	Análises de Design Higiênico.....	220
5.6.2	Acompanhamento e Análise de Critérios de Performance e Tempo de Vida Útil.....	220
5.6.3	Validação dos Protótipos.....	220
5.7	TESTES DOS DISPOSITIVOS DESENVOLVIDOS EM CAMPO.....	221
5.7.1	Análises de Design Higiênico.....	221

5.7.2	Acompanhamento e Análise de Critérios de Performance e Tempo de Vida Útil.....	221
5.8	APLICAÇÃO DO PROCESSO DE TRATAMENTO TÉRMICO.....	222
5.9	INSPEÇÃO POR LÍQUIDO PENETRANTE.....	223
5.10	APLICAÇÃO DO PROCESSO DE TRATAMENTO SUPERFICIAL.....	223
6	CONCLUSÕES.....	224
	Propostas de Temas para a continuidade da Pesquisa.....	226
	REFERÊNCIAS.....	227

1 INTRODUÇÃO

As indústrias modernas ou de classe mundial buscam cada vez mais desenvolver sistemas de produção estruturados com metodologias e instrumentos que possibilitem a aplicação difundida em toda a organização. Para tal, se faz necessário o envolvimento de todos os funcionários, de forma a permitir a melhoria radical do desempenho do sistema produtivo, e com isso entregar o produto ao cliente no prazo e com a qualidade requerida, eliminando, ao mesmo tempo, as atividades que não agregam valor, assim como qualquer outro tipo de perda, oriunda de mão-de-obra, equipamentos, materiais, energia, entre outros (ANTUNES, 2008).

Entre as metodologias de melhoria contínua mais utilizadas na atualidade, está a World Class Manufacturing (WCM) ou Manufatura de Classe Mundial, a qual integra e envolve todos os processos de uma planta industrial, de forma sistemática e organizada, visando a redução de custos, atacando as perdas e desperdícios (YAMASHINA, 2002), colaborando assim para que a mesma se torne mais competitiva em relação ao mercado, em nível de classe mundial (YAMASHINA, 2000).

No contexto da metodologia WCM, o Pilar Técnico Professional Maintenance (PM) ou Manutenção Profissional compreende as atividades finalizadas com a construção de um sistema de manutenção capaz de reduzir a zero os danos e as micro paradas das máquinas e dos equipamentos e obter economias, aumentando o ciclo de vida das mesmas, através da utilização de práticas de manutenção baseadas na capacidade de prorrogar a vida dos componentes (PALUCHA, 2012), sendo essa a ênfase da implementação do quarto passo desse Pilar, por meio de contramedidas sobre os pontos fracos das máquinas e prolongamento do ciclo de vida dos componentes, aumentando sua robustez via atividades de melhoramento focalizado, evitando assim seu deterioramento precoce (FELICE; PETRILLO, 2015) e eliminando assim manutenções desnecessárias.

Visando a aplicação desses conceitos e técnicas em ambiente fabril, surgiram demandas para desenvolvimento de novos dispositivos e componentes destinados à melhoria de performance dos equipamentos que compõem as linhas de produção da planta, tendo estes maior vida útil e menor custo de aquisição e fabricação, em parceria com Empresas Fornecedoras nacionais, de forma a quebrar um paradigma formado junto à Empresa, quanto à

existência de dificuldades no desenvolvimento de determinadas tecnologias e processos, localmente.

Dentro de uma abordagem mais específica, em uma indústria alimentícia, os aços inoxidáveis são os materiais mais empregados na construção de equipamentos, sistemas e processos fabris, devido à sua grande versatilidade. Por esta razão, o emprego destes vem alcançando um papel cada vez mais importante e, por que não dizer fundamental, nesse cotidiano (TELLES, 2003).

Os aços inoxidáveis aparecem como excelentes materiais para essas aplicações, pois são indicados para emprego em ambientes ou equipamentos sujeitos à temperaturas extremas de trabalho (altas ou baixas), atmosferas com altos índices de corrosão, quando há necessidade de não contaminação de fluidos por resíduos de corrosão, atividades envolvendo fluidos perigosos, quando seja exigida máxima proteção contra possíveis vazamentos e finalmente para aplicações em equipamentos ou componentes sujeitos a grandes esforços mecânicos ou que estejam sujeitos à contaminações microbiológicas (TELLES, 2003).

Porém, nem sempre é tão fácil manipular e fabricar dispositivos a partir de determinados tipos de aços inoxidáveis, tendo em vista muitas vezes a complexidade requerida às suas geometrias finais, tendo em contrapartida a elevada resistência mecânica destes materiais a determinados tipos de processos de fabricação, assim como a possibilidade da existência de não compatibilidade dos tratamentos térmico e superficial aplicados, e ainda levando-se em consideração a necessidade do cumprimento de todos os aspectos normativos de design higiênico para equipamentos fabris (TELLES, 2003).

Para tal, no escopo desse tipo de projeto devem ser desenvolvidos métodos, processos, ferramentas, tratamentos térmico e superficial adequados ao material empregado, para que se tenha um dispositivo final que atenda todos os requisitos de resistência mecânica, estrutural e qualidade fabril.

Este trabalho visa desenvolver um novo dispositivo de extração de picolés a partir de um molde, em parceria com Empresas Fornecedoras nacionais, com materiais, tratamentos térmico e superficial específicos e adequados, mais resistente às cargas impostas pelo maquinário e processo, de maior vida útil e menor custo de fabricação.

1.1 JUSTIFICATIVAS E NECESSIDADES PARA A REALIZAÇÃO DA PESQUISA

Nos últimos vinte anos, têm se mantido um paradigma quanto a incapacidade de desenvolvimento de tecnologia nacional no ramo das indústrias alimentícias, principalmente quando da possibilidade de criação de dispositivos, equipamentos e sistemas que tenham o mesmo nível de performance dos desenvolvidos pelos respectivos fabricantes, que em quase sua totalidade são internacionais.

Com isso, tem surgido um crescente interesse nas áreas de tecnologia e produtividade aplicada (CORTES, 2010), no tocante ao desenvolvimento de dispositivos e componentes mecânicos fabricados em aço inoxidável, embora a pesquisa acadêmica referente este tipo de material e seus processos de fabricação envolvendo os tipos ferrítico e martensítico, em consonância com os tratamentos térmico com sequenciamento e superficial por eletrodeposição de níquel seja bastante limitada.

Apesar do aço inoxidável ser o material metálico mais largamente utilizado em indústrias alimentícias (TELLES, 2003), não há registros de trabalhos apresentados envolvendo o tipo martensítico, em consonância com os tratamentos térmico com sequenciamento e superficial por eletrodeposição de níquel, que vise uma aplicação prática em ambiente fabril, nem tão pouco que seja balizada por uma metodologia de melhoria contínua e produtividade, com ênfase em redução de custos, perdas e desperdícios, de forma a ratificar a necessidade do uso de conhecimentos teóricos aplicáveis de forma efetiva, gerando valor real agregado ao trabalho.

Além disso, até o presente momento não foi apresentado nenhum trabalho que abordasse tecnicamente todo o desenvolvimento de dispositivo de extração de picolés a partir de um molde, em indústrias alimentícia, seja em território nacional ou internacional.

Também, o desenvolvimento desse dispositivo foi escolhido em virtude de mesmo este parecer, a princípio, construtivamente simples, possuir uma das geometrias mais complexas dentre todos os dispositivos inseridos nos equipamentos inseridos no escopo de todo processo de fabricação de picolés de tecnologia “*moldados com palito*”, abranger inúmeros processos e técnicas de fabricação, assim como diversos métodos de cálculo estrutural, ser perfeitamente prototipável e testável em campo sob condições reais de usabilidade, além de possuir ótima

viabilidade financeira quanto à sua implementação, e com isso ter-se subsídio para o aproveitamento do escopo deste trabalho, a fim de desenvolver todo e qualquer outro dispositivo ou componente mecânico que se deseje, seguindo a mesma sequência de ações, como premissa da fase de padronização e expansão “*action*”, no âmbito da metodologia WCM.

O interesse da comunidade acadêmica por metodologias de produtividade aplicada vem se sedimentando, tendo em vista as inúmeras possibilidades de implementação de projetos e “*cases*” em Empresas dos mais diversos ramos industriais, de forma a consolidar cada vez mais as parcerias com estas, e com isso resolver problemas antes tidos como não solucionáveis, a curto e médio prazo. Esta constatação diante do contexto industrial foi verificada pelo autor durante sete anos de trabalho nas unidades fabris de uma Empresa, quando do seu percurso profissional.

Espera-se, ao fim desse trabalho, a comprovação que a correta caracterização dos materiais, por meio de técnicas e ensaios específicos, o uso de ferramentas de cálculo estrutural e engenharia reversa, processos de tratamento térmico e superficial adequados aos materiais empregados, assim como os devidos processos de fabricação façam com que o dispositivo de extração de picolés a partir de um molde desenvolvido seja mais resistente às cargas impostas pelo maquinário e processo, tenha maior vida útil e menor custo de fabricação, em relação ao dispositivo ora empregado.

1.2 CONTEÚDO DA TESE

Esta tese está organizada em seis capítulos. O terceiro capítulo explica tecnicamente o contexto da metodologia WCM, mais especificamente o quarto passo de implementação do Pilar Técnico Profissional Maintenance, descrevendo possíveis contramedidas para combater pontos críticos de máquinas e prolongar a vida útil de componentes.

Também apresenta uma revisão de literatura referente a materiais metálicos, mais especificamente aços inoxidáveis austeníticos, martensíticos e ferríticos, uma explicação detalhada sobre os aspectos técnicos envolvidos na aplicação de tratamentos térmicos com sequenciamento, assim como o descritivo de processos e técnicas de fabricação, bem como dos tratamentos superficiais aplicáveis a metais, mais especificamente a aços inoxidáveis e dos

métodos adotados para a realização de ensaios mecânicos e caracterização dos materiais constantes nos dispositivos.

Por fim, abrange os conceitos e memoriais descritivos de dimensionamento e cálculo que envolvem as análises estruturais de componentes críticos dos dispositivos, por meio dos métodos de elementos finitos e engenharia reversa, como base para a execução de todo o trabalho de prototipagem e desenvolvimento de um novo dispositivo de extração.

O quarto capítulo descreve os procedimentos e métodos adotados para a realização de ensaios mecânicos e análises de caracterização dos materiais constantes no dispositivo de extração já existente e do protótipo, contextualização e caracterização dos novos materiais empregados no dispositivo desenvolvido, em sua versão final, assim como todo o processo de fabricação do protótipo e da versão final do dispositivo desenvolvido, com ênfase no desenvolvimento de ferramentas de fabricação e matrizes de conformação mecânica e aplicação de tratamentos térmico e superficial específicos.

Também descreve toda a sistemática de instalação do protótipo e dispositivo desenvolvido em sua versão final no equipamento, testes em campo, acompanhamento e análise de critérios de performance e tempo de vida útil dos mesmos.

O quinto capítulo apresenta os resultados dos ensaios mecânicos, das análises de caracterização dos materiais, das análises estruturais e de performance em campo do dispositivo de extração já existente, do protótipo e do novo dispositivo desenvolvido, de forma a comparar parâmetros de projeto, resistência às cargas impostas pelo maquinário e processo, e consequente vida útil e custo de fabricação.

O sexto capítulo relata as considerações finais sobre todo o estudo realizado e apresenta recomendações e possibilidades para novos estudos sobre o tema.

2 OBJETIVOS

Serão descritos a seguir o objetivo geral bem como os objetivos específicos do trabalho.

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um dispositivo de extração de picolés a partir de moldes, aplicado em equipamento de indústria alimentícia, fabricado em aço inoxidável AISI 420, com tratamento térmico com sequenciamento e tratamento superficial com eletrodeposição de níquel, com maior vida útil e menor custo de fabricação, seguindo os preceitos da metodologia WCM.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar a metodologia WCM, com ênfase na implementação do quarto passo do Pilar Técnico Manutenção Profissional, e com isso descrever as contramedidas para combater pontos críticos de máquinas e prolongar a vida útil de componentes;
- Dimensionar, calcular e comparar os parâmetros de projeto do dispositivo de extração existente, mais especificamente dos componentes críticos, por meio de análises estruturais, utilizando os métodos de elementos finitos e de engenharia reversa;
- Realizar a caracterização das ligas metálicas dos componentes críticos do dispositivo de extração existente;
- Desenvolver um novo dispositivo de extração, levando-se em consideração novas análises estruturais e de engenharia reversa de seus componentes críticos, a contextualização e caracterização de novos materiais de construção empregados, assim como as aplicações de tratamentos térmico e superficial adequados;
- Realizar ensaios mecânicos e de performance nos materiais empregados no dispositivo de extração existente e no novo dispositivo desenvolvido, de forma a analisar e comparar as propriedades mecânicas finais e influência do tratamento térmico empregado;

- Desenvolver matrizes de conformação mecânica e processos de fabricação adequados ao projeto dos novos dispositivos;
- Realizar testes de performance nos dispositivos de extração desenvolvidos, em condições reais de operação, de forma a validar a implementação do mesmo;
- Realizar estudos de tempo de vida útil do dispositivo desenvolvido, de forma a prever os tempos de substituições do mesmo, e com isso realizar um melhor detalhamento de sistemáticas de manutenções preventivas do equipamento que o contém.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Serão descritos a seguir os tópicos referentes à toda a revisão de literatura que permeia a execução do trabalho.

3.1 SISTEMA DE PRODUÇÃO

Sistema de Produção constitui um conjunto estruturado de metodologias e de instrumentos cuja aplicação é difundida em toda a organização, através do envolvimento de todos os funcionários (ANTUNES, 2008). Permite a melhoria radical do desempenho do sistema produtivo, de forma a entregar o produto ao cliente no prazo, com a qualidade requerida, eliminando ao mesmo tempo as atividades que não agregam valor ou qualquer outro tipo de perda oriunda de mão-de-obra, equipamentos, materiais, energia, entre outros.

3.2 METODOLOGIA WCM

World Class Manufacturing (WCM) ou Manufatura de Classe Mundial é uma metodologia de melhoria contínua que integra e envolve todos os processos de uma planta industrial e visa a redução de custos, atacando as perdas e desperdícios (YAMASHINA, 2002). Após identificar e quantificar financeiramente estas perdas, é realizada uma priorização para atacá-las, por meio de projetos de melhoria.

Para PADDOCK (1993), o WCM representa as melhores práticas mundiais em ação para manter a competitividade no mercado, de forma a alcançar a excelência. Traduz-se como o nível de excelência de todo o ciclo logístico-produtivo, referido às metodologias aplicadas e ao desempenho alcançado pelas melhores organizações mundiais. Baseia-se nos conceitos das metodologias Total Quality Control (TQC), Total Productive Maintenance (TPM), Total Industrial Engineering (TIE) e Just In Time (JIT). Todas elas são igualmente importantes, mas todas possuem a falha de não estabelecer uma relação direta entre as atividades e os benefícios da redução de custos. Assim, o WCM possibilita essa abordagem de consciência para custos de modo que os benefícios conseguidos pelos funcionários da Empresa sejam avaliados corretamente (CORTES, 2010). O nível alcançado por cada organização é certificado por especialistas e é obtido através da melhoria contínua do desempenho operacional e do envolvimento constante de todos os níveis de funcionários da Empresa.

O WCM é composto por dez Pilares Técnicos e dez Pilares gerenciais, os quais devem ser gerenciados adequadamente, de modo que seja possível elevar a planta a um padrão de classe mundial (YAMASHINA, 2006). O WCM constitui, portanto, a referência e o ponto de partida de um sistema de produção, fornecendo os padrões de excelência, englobando a definição dos objetivos entre os vários polos produtivos, unidades operativas, subsidiando a sucessiva avaliação homogênea do desempenho (YAMASHINA, 2000).

3.2.1 Objetivo do WCM

O objetivo do WCM é alcançar a melhoria contínua dos processos de uma forma sistemática e organizada, com a finalidade de obter o máximo de benefício com o mínimo de custo, combatendo todos os desperdícios e perdas em todos os seus tipos, sempre contando com o envolvimento de todos os funcionários da Empresa, aplicando com rigor as metodologias e instrumentos, difundindo e padronizando os resultados alcançados, colaborando assim para que a mesma se torne mais competitiva em relação ao mercado, de forma a alcançar a competitividade de classe mundial (YAMASHINA, 2000).

Uma Empresa não pode crescer apenas cortando os seus custos, visto que essa medida não será suficiente para torná-la competitiva, pelo contrário, os investimentos devem ser feitos nas áreas corretas para que se consiga fortalecer as barreiras competitivas. No âmbito da manufatura, os investimentos devem ser feitos na melhoria da produtividade e aumento de desempenho. Assim, será possível aumentar os valores de eficiência e reduzir os custos ao mesmo tempo, melhorando o processo produtivo, possibilitando o crescimento, de forma a competir mundialmente (FARIA, 2012). O WCM é um meio pelo qual identifica-se perdas, descobre-se as respectivas causas através as ferramentas e resolve-se problemas crônicos de sistemas produtivos.

3.2.2 Princípios Básicos do WCM

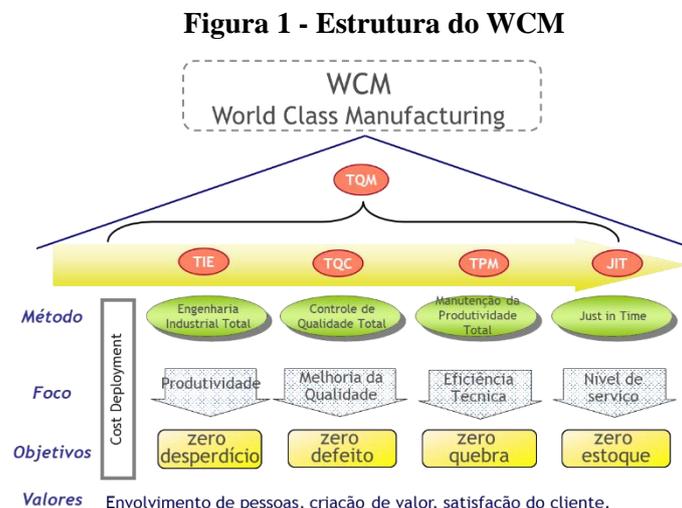
O WCM se baseia em importantes e desafiadores princípios, onde a metodologia é introduzida e difundida a partir dos membros dos mais altos níveis hierárquicos da organização, até abranger todos os funcionários operacionais em chão de fábrica (sistemática “*top-down*”), contando com o comprometimento e contribuição constante de todos (DIGALWAR; SANGWAN, 2007). Parte-se do princípio que a metodologia é uma forma de se trabalhar, e

não um projeto, que se fortalece e se desenvolve com o envolvimento geral, onde são requeridos métodos, instrumentos, padrões e rigor na aplicação, sendo sempre conduzida como um sistema visível e transparente, de forma a ser eficaz, uma vez que visa o essencial.

Os princípios básicos do WCM englobam visão de perspectiva, visualização, uso de métodos e ferramentas corretas, busca pelo zero ótimo, contramedidas contra causa raiz e não contra sintomas, orientação aos detalhes e conscientização para o custo (GAJDZIK, 2013). Para tal, devem ser observados fatores como identificação de quais problemas serão estudados e como realizar a correta detecção de onde estes acontecem. Com isso, realizar a priorização em quais processos, máquinas e áreas deve-se atuar primeiro, com base nos desdobramentos ou estratificações de custos (YAMASHINA, H.; KUBO, 2002). Posteriormente, deve-se analisar e escolher o método de resolução adequado, estimar qual o custo de implementação das soluções, implementar as mesmas com rigor, de forma a avaliar os resultados atingidos em comparação ao objetivo inicial.

3.2.3 Estrutura do WCM

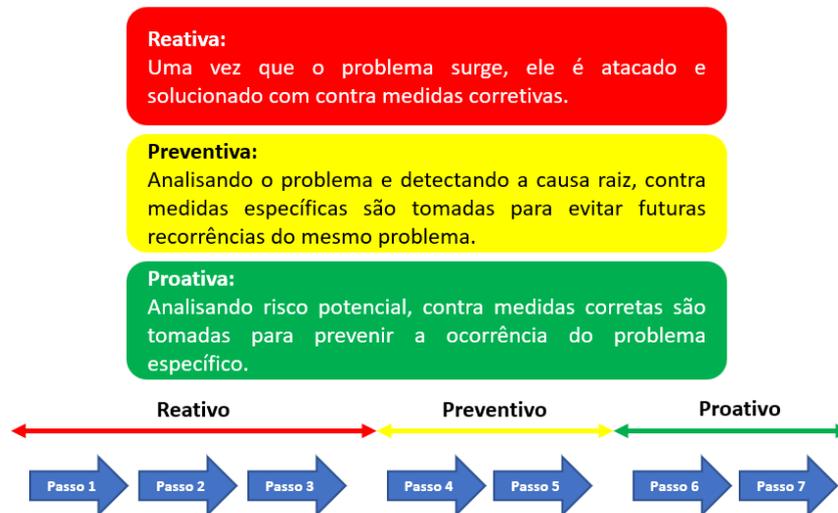
A estrutura do WCM baseia-se nos conceitos das metodologias “Lean”, com foco em produtividade, melhoria de controle de qualidade, eficiência técnica e nível de serviço, com o objetivo de reduzir ou extinguir desperdícios, defeitos, quebras em equipamentos e estoque, respectivamente. Os valores da metodologia estão amparados no envolvimento das pessoas, agregação de valor e satisfação dos clientes (CHIARINI; VAGNONI, 2015). A Figura 1 mostra a estrutura do WCM.



Fonte: Chiarini; Vagnoni (2015)

Esta mesma estrutura pode ser traduzida com base na implementação de dez Pilares Técnicos, por meio da abordagem dos “sete passos” e dez Pilares Gerenciais (PALUCHA, 2012). Para a maioria das aplicações, mas principalmente dentro da abordagem dos “sete passos” de cada Pilar, o WCM faz uso do conteúdo descrito em fases (fases reativas, preventivas e proativas), conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Abordagem dos sete passos dos Pilares Técnicos do WCM



Fonte: Palucha (2012)

A Tabela 1 descreve todos os Pilares Técnicos da estrutura do WCM, enquanto que a Tabela 2 descreve todos os Pilares Gerenciais da sua estrutura.

Tabela 1 - Pilares Técnicos da Estrutura do WCM

PILARES TÉCNICOS	SIGLA	SIGNIFICADO
Safety	<i>Saf</i>	Segurança, Higiene e Saúde
Cost Deployment	<i>CD</i>	Desdobramento de Custos
Focused Improvement	<i>FI</i>	Melhoria Focada
Autonomous Activities	<i>AA</i>	Atividades Autônomas
Professional Maintenance	<i>PM</i>	Manutenção Profissional
Quality Control	<i>QC</i>	Controle de Qualidade
Logistics & Costumer Service	<i>LCS</i>	Atendimento ao Cliente e Logística
Early Equipment Management	<i>EEM</i>	Gerenciamento Antecipado de Equipamentos
People Development	<i>PD</i>	Desenvolvimento de Pessoas
Enviroment	<i>ENV</i>	Meio Ambiente

Fonte: Yamashina (2006)

Tabela 2 - Pilares Gerenciais da Estrutura do WCM

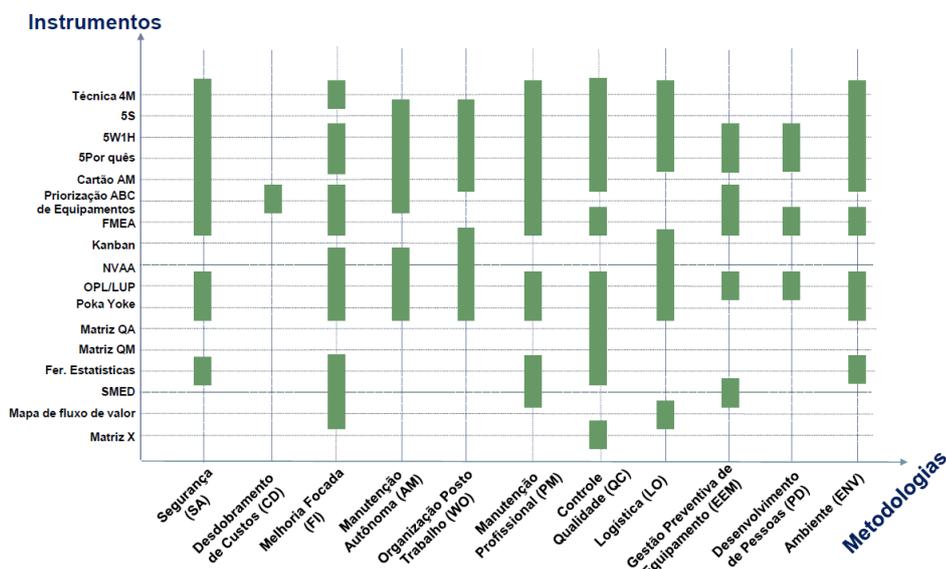
PILARES GERENCIAIS	SIGLA	SIGNIFICADO
Management Commitment	MC	Compromisso da Gestão
Clarity of Objectives	CL	Clareza de Objetivos
Rout Map of WCM	RM	Mapa de Rota do WCM
Alocation of Highly Qualified People	AHQP	Alocação de Pessoas Altamente Qualificadas
Commitment of Organization	CM	Compromisso da Organização
Competence of Organization	CP	Competência da Organização
Time & Budget	TB	Tempo e orçamento
Level of Detail	LD	Nível de Detalhe
Level of Expansion	LE	Nível de Expansão
Motivation of Operators	MO	Motivação dos Operadores

Fonte: Yamashina (2002)

3.2.4 Métodos e Ferramentas do WCM

Cada perda do processo pode ser atacada utilizando métodos, ferramentas ou instrumentos inseridos nos Pilares Técnicos (SAXENA; SAHAY, 2000). A Figura 3 mostra essa correspondência, no formato de matriz, e identifica as principais correlações aplicáveis entre as metodologias apresentadas nos Pilares Técnicos e os instrumentos operacionais. Para cada uma das metodologias são indicados os instrumentos utilizados nas suas aplicações.

Figura 3 - Matriz de correspondências no WCM



Fonte: Saxena; Sahay (2000)

3.3 PILAR PROFESSIONAL MAINTENANCE (PM)

O Pilar Técnico Professional Maintenance ou Manutenção Profissional compreende as atividades finalizadas com a construção de um sistema de manutenção capaz de reduzir a zero os danos e as micro paradas das máquinas e dos equipamentos e com isso obter economias, aumentando o ciclo de vida das máquinas através da utilização de práticas de manutenção baseadas na capacidade de prorrogar a vida dos componentes (PALUCHA, 2012).

A Manutenção Profissional faz parte do processo de melhoria contínua do sistema técnico do estabelecimento, também constituído das atividades de melhoria focada, de Manutenção Autônoma e de gestão antecipada da implementação de novos equipamentos.

3.3.1 Objetivos do Pilar Professional Maintenance

Os objetivos do Pilar Manutenção Profissional são (YAMASHINA, 2014):

- Maximizar a confiabilidade dos equipamentos;
- Reduzir os custos de manutenção;
- Eliminar as quebras que ocorrem por falta de manutenção;
- Minimizar as perdas referentes a problemas de segurança e de qualidade através da melhoria da confiabilidade e controle de processos mais robustos;
- Reduzir as atividades de manutenção não-planejadas e reconduzi-las somente às máquinas não prioritárias;
- Utilizar a combinação justa das diversas práticas de manutenção como Autonomous Maintenance ou Manutenção Autônoma (AM), Breakdown Maintenance ou Manutenção Corretiva (BDM), Time Based Maintenance ou Manutenção Baseada no Tempo (TBM), Condition Based Maintenance ou Manutenção Baseada na Condição (CBM), para estabelecer e manter a melhor condição dos equipamentos, com os menores custos e a maior eficácia;
- Aumentar o peso percentual das manutenções preditiva, preventiva e de melhoria;
- Promover boas capacidades de planejamento da manutenção;
- Difundir uma cultura determinada a obter taxa zero de falhas e de paradas;

- Desenvolver internamente as competências de manutenção, seja no nível dos operadores para a atividades de controle, inspeção e lubrificação, seja no nível técnico especializado do pessoal da manutenção e das engenharias;
- Maximização da vida útil dos equipamentos.

3.3.2 Estrutura do Pilar Professional Maintenance

Assim como os demais Pilares Técnicos do WCM, o Pilar Manutenção Profissional está estruturado em sete passos de implementação. As atividades que compõem os três primeiros passos têm o propósito de estabilizar o tempo médio entre as falhas - MTBF (Mean Time Between Failures), através da eliminação e da prevenção da degradação acelerada, das análises das falhas e da definição dos padrões de manutenção preventiva, respectivamente. A abordagem é a da manutenção corretiva. Ao término dos três primeiros passos as falhas sobre as máquinas críticas devem ser levadas à zero. Os passos quatro, cinco e seis têm o propósito de prolongar o ciclo de vida das máquinas, através do combate de “*pontos fracos*” das mesmas, construção de um sistema de manutenção preventiva e posteriormente de um sistema de manutenção preditiva, respectivamente. O passo sete tem o propósito de institucionalizar, gerir e avaliar continuamente o sistema de manutenção planejado (YAMASHINA, 1995). A Figura 4 mostra a estrutura do Pilar Manutenção Profissional, dentro da abordagem dos sete passos de implementação.

Figura 4 - Estrutura do Pilar Manutenção Profissional dentro da abordagem dos sete passos de implementação



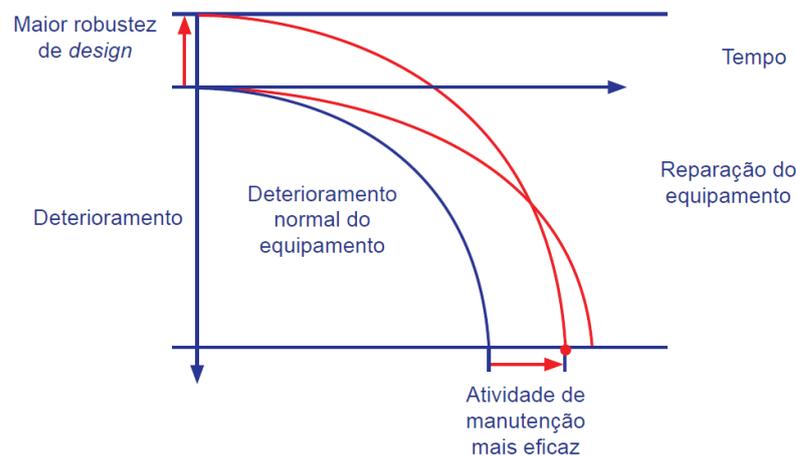
Fonte: Yamashina (1995)

No âmbito do estabelecimento, é nomeado o líder do Pilar Manutenção Profissional e ativada a equipe constituída dos facilitadores do Pilar nas diversas Unidades Operativas. Em cada uma das Unidades Operativas são ativadas as equipes executivas de Manutenção Profissional, das quais participam os técnicos da manutenção e os gerentes, especialistas em engenharia e a equipe líder de manutenção.

3.3.3 O Quarto Passo de Implementação do Pilar Professional Maintenance

O quarto passo de implementação do Pilar Manutenção Profissional compreende a realização de contramedidas para combater os pontos fracos das máquinas, de forma a obter-se como consequência o prolongamento do ciclo de vida dos equipamentos, evitando assim seu deterioramento precoce, através de projetos que proporcionem maior robustez aos componentes (por meio de atividades focalizadas que eliminem eventuais fraquezas individuais), ou que reduzam os esforços (solicitação média de trabalho) sobre os mesmos (FELICE; PETRILLO, 2015). A relação entre eficácia das atividades de manutenção e o tempo de deterioramento do equipamento é mostrado na Figura 5.

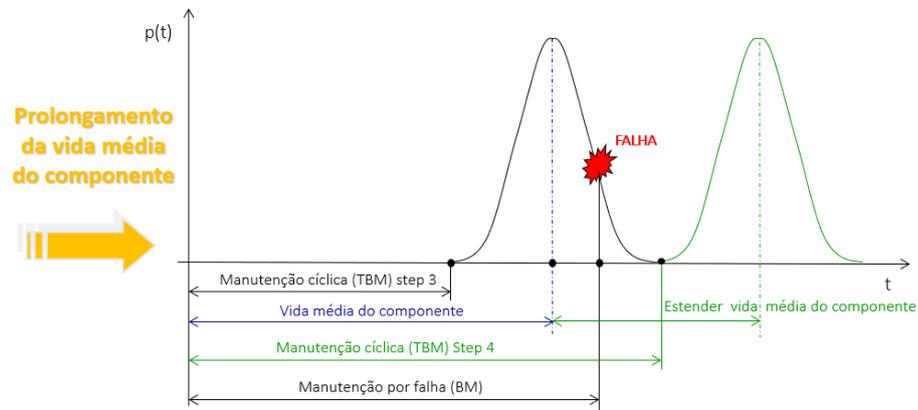
Figura 5 - Relação entre eficácia das atividades de manutenção e o tempo de deterioramento do Equipamento



Fonte: Felice; Petrillo (2015)

Dessa forma, é possível obter-se a eliminação das manutenções desnecessárias, redução do MTTr (tempo médio de substituição ou tempo médio de reparo) e aumento do tempo entre substituições (TBr) (YAMASHINA, 2006). A Figura 6 mostra uma visão sistemática do prolongamento da vida média de um componente.

Figura 6 - Visão sistemática do prolongamento da vida média de um componente



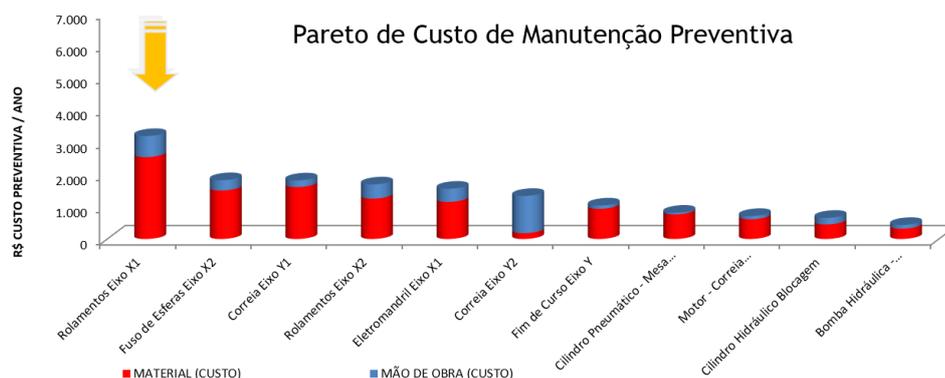
Fonte: Yamashina (2006)

De acordo com YAMASHINA (2006), para decidir sobre qual componente agir, na ótica de prolongamento da vida média, é necessário classificar os componentes através do custo total de manutenção preventiva, o qual pode ser calculado pela Equação 1, sendo expresso em reais.

$$\text{Custo}_{\text{manutenção}} = (\text{Custo}_{\text{mat}} \times \text{Nr}) + (\text{Custo}_{\text{MDO}} \times \text{Hh} \times \text{Nr}) \quad (1)$$

Na Equação 1, $\text{Custo}_{\text{mat}}$ é o custo da peça de reposição, expresso em reais, Nr é a quantidade de substituições do componente no ano, $\text{Custo}_{\text{MDO}}$ é o custo da mão-de-obra, expresso em reais e Hh é o homem-hora ou tempo de execução da atividade, expresso em horas. Uma vez calculados todos os custos de manutenção preventiva da máquina, deve-se analisar quais atividades serão priorizadas. Para tal, pode-se usar gráficos do tipo pareto como ferramenta de análise, conforme exemplo mostrado na Figura 7.

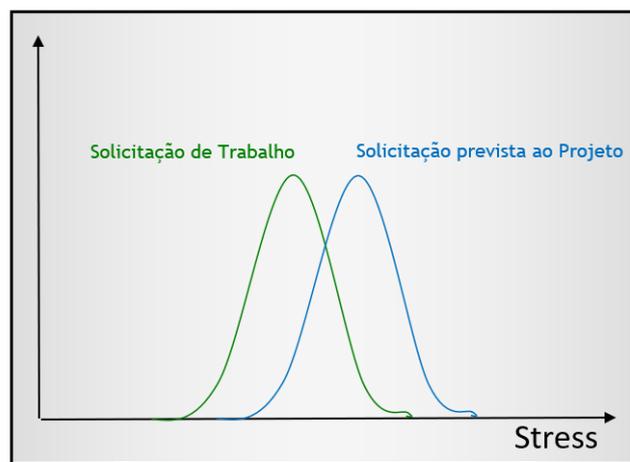
Figura 7 - Exemplo de análise de custos de manutenção preventiva e priorização de atividades por meio de gráfico do tipo pareto



Fonte: Yamashina (2006)

De acordo com NOVICKA; PAPCUN; ZOLOTOVA (2016), melhoramento focalizado sobre o componente ou sobre o processo é aquele que prolonga a vida média do mesmo, permitindo um intervento de manutenção planejada com uma frequência menor, quando comparada à manutenção planejada considerada antes do melhoramento. Com isso, há uma consequente redução no custo total de manutenção preventiva. Para se conseguir o prolongamento da vida média do componente, deve-se analisar o comportamento da curva de solicitação de trabalho em relação à curva de solicitação prevista ao projeto, em termos de stress, conforme mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Comportamento das curvas de solicitação de trabalho e de solicitação prevista ao projeto para um componente, em termos de stress

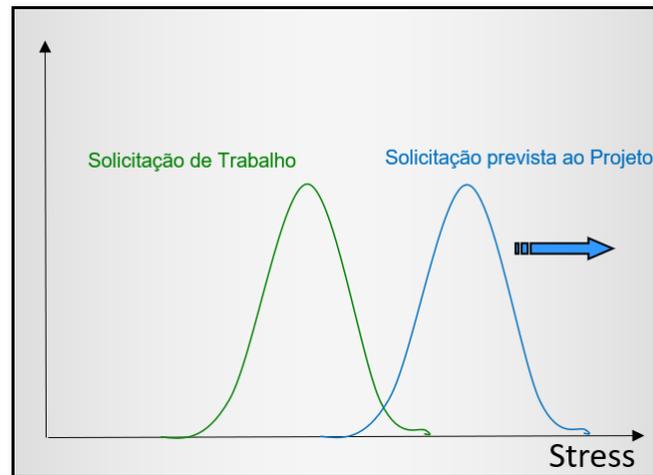


Fonte: Novicka; Papcun; Zolotova (2016)

Quanto mais próximo o nível médio de solicitação de trabalho do componente está do nível médio de solicitação previsto a projeto, menor será a vida média do componente. Para prolongar a vida média do componente, deve-se distanciar o quanto for possível as duas curvas.

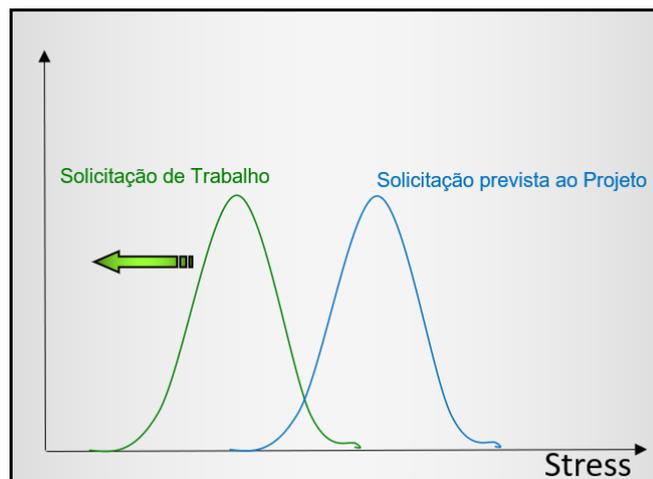
De acordo com NOVICKA; PAPCUN; ZOLOTOVA (2016), existem duas formas possíveis de se conseguir esse distanciamento entre as duas curvas, sendo uma com o aumento da robustez do componente, por meio do aumento da solicitação prevista ao projeto (melhoramento focalizado sobre o componente), conforme mostrado na Figura 9, e a outra fortalecendo o processo, por meio da redução da solicitação média de trabalho sobre o componente (melhoramento focalizado no processo), conforme mostrado na Figura 10.

Figura 9 - Visão esquemática do aumento da robustez do componente, por meio do aumento da solicitação prevista ao projeto (melhoramento focalizado sobre o componente)



Fonte: Novicka; Papcun; Zolotova (2016)

Figura 10 - Visão esquemática do fortalecimento do processo, por meio da redução da solicitação média de trabalho sobre o componente (melhoramento focalizado no processo)



Fonte: Novicka; Papcun; Zolotova (2016)

Para implementar o quarto passo do Pilar Manutenção Profissional, deve-se primeiro escolher o componente em que será trabalhado, com base no Pareto de custos, posteriormente realizar um estudo a fim de compreender o porquê do desgaste daquele componente, quais são os fatores estressores que têm influência sobre o mesmo, e por último propor uma melhoria no componente em si ou no processo, mitigando esse fator estressante, resultando em um aumento da vida útil do componente priorizado (YAMASHINA, 1995).

Substituir um componente por outro com a mesma aplicação, mas com custo menor, não é uma melhoria de passo quatro da metodologia de implementação do Pilar Manutenção

Profissional. Encontrar uma nova tecnologia no mercado, mais atual e sofisticada, ou substituir um componente obsoleto, também não são melhorias desse passo (YAMASHINA, 2000).

Além das atividades de prolongamento da vida média do componente, durante o passo quatro, também devem ser realizadas atividades para redução do MTTr. Em um componente cujo custo de manutenção preventiva é composto por um considerável custo de mão-de-obra, deve se agir sobre a redução do MTTr, ou seja, a quantidade de Hh empregada naquela atividade.

De acordo com YAMASHINA (2014), após a consolidação da implementação do terceiro passo da metodologia do Pilar, a melhoria do MTBF de um componente acontece somente quando se torna possível melhorar a fraqueza intrínseca do componente, isso é, quando se consegue melhorar o limite estrutural do componente, que em geral é definido no projeto e algumas vezes nas condições operativas de funcionamento.

Em suma, as atividades de implementação do quarto passo do Pilar Manutenção Profissional constituem a condução de atividades de melhoria focada, identificação da solução de melhoria dos pontos fracos da máquina, realização da análise custo/benefício da solução de melhoria, implementação da solução de melhoria, realização do monitoramento, e por fim examinação da tendência e execução da manutenção.

3.4 AÇOS

Para CHIAVERINI (2008), aço é uma liga ferro-carbono contendo geralmente de 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono (C), além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação. Para CALLISTER (2012), os aços são ligas ferro-carbono que podem conter concentrações apreciáveis de outros elementos de liga. Existem milhares de ligas com diferentes composições químicas e/ou tratamentos térmicos. As propriedades mecânicas são sensíveis ao teor de carbono, o qual normalmente é inferior a 1,0% em peso.

Os aços são produzidos basicamente de duas formas: pela redução do minério de ferro ou pela reciclagem de sucata de aço (ASKELAND; PHULÉ, 2011) e podem ser classificados com base em suas composições químicas ou pela forma como foram produzidos. Aços-carbono

contêm até cerca de 2% de carbono e também podem conter outros elementos químicos, tais como silício (Si, máximo de 0,6%), cobre (Cu, máximo de 0,6%) e manganês (Mn, máximo de 1,65%).

Aços-liga possuem teores importantes de elementos de liga, além do carbono, os quais melhoram a sua temperabilidade e tenacidade. São definidos pela AISI (American Iron and Steel Institute) como aqueles cuja composição de pelo menos um dos seguintes elementos químicos seja superado: 1,65% de manganês, 0,6% de silício e 0,6% de cobre, e, ainda, que o teor de carbono seja inferior a 1% e a soma do teor total dos demais elementos de liga seja menor que 5%. Um aço também é classificado como aço-liga se concentração dos elementos de liga níquel (Ni), cromo (Cr), molibdênio (Mo) e titânio (Ti) estiver especificada de modo bastante rigoroso. Alguns aços especiais podem ter teores mais elevados de enxofre (S, maior que 0,1%) ou chumbo (Pb, entre 0,15 e 0,35%) para melhorar a usinabilidade, entretanto, esses aços não podem ser soldados com facilidade.

Os aços também podem ser classificados com base em seu processamento. Por exemplo, o termo “*lingotamento contínuo*” refere-se ao processos de solidificação de aços de modo contínuo, produzindo formas intermediárias, como placas. Os aços galvanizados possuem uma cobertura de zinco (Zn) para aumentar a resistência à corrosão. Da mesma forma, aços revestidos com estanho (Sn), também chamados de “*folha de Flandres*”, são usados para fabricar produtos resistentes à corrosão, no ramo alimentício. Os aços produzidos em forno elétrico podem receber a denominação “*E*” de elétrico, enquanto os aços que têm uma pequena quantidade de boro (B), de 0,0005 a 0,0030%, são denominados “*B*” de boro.

3.4.1 Aços Inoxidáveis

Recebem a denominação geral de “*aços-liga*” (alloy-steel) todos os aços que possuam qualquer quantidade de outros elementos, além dos que entram, normalmente, na composição química dos aços-carbono, ou os aços que contenham os mesmos elementos do aço-carbono em proporções mais altas (TELLES, 2003). Os elementos adicionais são denominados de “elementos de liga”. Conforme a percentagem total de elementos de liga presentes, distinguem-se três classes de aços-liga:

- Aços de baixa liga (low alloy steel): até 5% de elementos de liga;

- Aços de média liga (intermediate alloy-steel): de 5% a 10% de elementos de liga;
- Aços de alta liga (high alloy-steel): mais de 10% de elementos de liga.

Os chamados aços inoxidáveis (stainless steel) são aços de alta liga contendo, pelo menos, 12% de cromo, o que lhes confere a propriedade de não enferrujarem, mesmo pela exposição prolongada a uma atmosfera normal, o que não significa, entretanto, que não sofram nenhum processo corrosivo. O cromo é o elemento de liga básico dos aços inoxidáveis, cuja passivação é conseguida pela formação de uma película de óxidos e hidróxidos de cromo na superfície do metal (TELLES, 2003). Para CALLISTER (2012), a resistência à corrosão também pode ser melhorada pela adição de níquel e molibdênio.

De acordo com ASKELAND; PHULÉ (2011), o cromo também é um elemento estabilizador da ferrita, chamado, por essa razão, de “*alfagênico*”. O cromo provoca o encolhimento da região de austenita (γ) e aumenta a região de ferrita (α). No caso de composições com alto teor de cromo e muito baixo teor de carbono, a ferrita está presente como uma fase única até a temperatura “*solidus*”. Nesse caso, a ferrita é sólida e estável em todas as temperaturas.

Os aços inoxidáveis contêm geralmente de 12 a 26% de cromo, até 22% de níquel e, frequentemente, pequenas quantidades de outros elementos de liga. São consideravelmente mais caros do que os aços-carbono e os aços de baixa liga. Existem também aços inoxidáveis especiais, com teores mais altos de cromo e níquel. A película passivadora de óxidos e hidróxidos de cromo, quando o aço é exposto em atmosfera contendo oxigênio, que é resistente e uniforme, tem excelente aderência e plasticidade, baixa porosidade e volatilidade e solubilidade praticamente nulas. O grau de inoxidabilidade ao aço depende da estabilidade dessa película, que tem uma espessura média de cerca de 0,02 micrometros (μm) (CHIAVERINI, 2008).

Os casos gerais de emprego dos aços inoxidáveis são os mesmos para os aços liga, como: ambientes ou equipamentos sujeitos à temperaturas extremas de trabalho (altas ou baixas), aplicações em atmosferas com altos índices de corrosão, quando há necessidade de não contaminação de fluidos pelos resíduos de corrosão, serviços com fluidos perigosos, quando seja exigido máxima proteção contra possíveis vazamentos e aplicações em equipamentos ou componentes sujeitos a grandes esforços mecânicos.

Existe uma grande variedade de tipos de aços inoxidáveis. Só a American Society for Testing and Materials (ASTM) define mais de oitenta tipos diferentes. Os tipos convencionais mais antigos costumam ser classificados em três grupos, de acordo com a estrutura metalúrgica predominante na liga, em temperatura ambiente:

- Aços inoxidáveis martensíticos: basicamente ligas ferro-cromo (Fe-Cr), temperáveis;
- Aços inoxidáveis austeníticos: basicamente ligas ferro-cromo-níquel (Fe-Cr-Ni), não temperáveis;
- Aços inoxidáveis ferríticos: basicamente ligas ferro-cromo (Fe-Cr), não temperáveis.

Para CALLISTER (2012), os aços inoxidáveis são divididos em três classes, com base na fase constituinte predominante em sua microestrutura. Os aços inoxidáveis martensíticos são capazes de ser tratados termicamente, de tal maneira que a martensita é o principal microconstituente. As adições de elementos de liga em concentrações significativas produzem mudanças drásticas no diagrama de fases para ferro-carbeto de ferro.

Para os aços inoxidáveis austeníticos, o campo de fases da austenita é estendido até a temperatura ambiente. Os aços inoxidáveis ferríticos são compostos pela fase ferrita de estrutura cúbica de corpo centrado (CCC). Os aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos são endurecidos e têm sua resistência aumentada por trabalho a frio, uma vez que não são tratáveis termicamente. Os aços inoxidáveis austeníticos são os mais resistentes à corrosão, devido aos seus altos teores de cromo e também a adições de níquel. Tanto os aços inoxidáveis martensíticos quanto os ferríticos são magnéticos, enquanto que os aços inoxidáveis austeníticos não.

De acordo com TELLES (2003) existem, ainda, aços de estrutura mista intermediária, ferrítica-austenítica, e ferrítica-martensítica. Além dos tipos convencionais, mais antigos, têm sido desenvolvidos modernamente aços inoxidáveis especiais, principalmente para conseguir-se maior resistência à corrosão ou maior resistência mecânica.

É importante salientar que a aparência externa de todos os aços inoxidáveis é quase a mesma e, portanto, a distinção visual entre os diversos tipos é praticamente impossível. Esse fato obriga a um rigoroso sistema de identificação, marcação e controle de materiais, em todas as etapas de compra, recebimento e estocagem de matéria-prima, bem como na própria

fabricação do equipamento, dispositivo ou componente, principalmente nos casos em que o uso indevido de um material no lugar de outro possa ter consequências graves. Para ASKELAND; PHULÉ (2011), existem diversos tipos de aços inoxidáveis, baseados na estrutura cristalina e no mecanismo de endurecimento.

As diferenças de potencial entre quaisquer tipos de aços inoxidáveis são desprezíveis, não havendo, portanto, problemas de corrosão galvânica pelo contato mútuo. Embora a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis seja, em geral, muito boa, isso não significa que sejam imunes a qualquer oxidação e muito menos a qualquer processo corrosivo. Como a passivação desses aços é devida à formação de óxidos de cromo, a sua resistência é boa principalmente aos meios oxidantes, aumentando, em geral, com o aumento da quantidade de cromo.

Quase todos esses aços estão sujeitos à corrosão por pites e corrosão em frestas nos meios em que a passivação é rompida ou não consegue se formar completamente. De um modo geral, a resistência à corrosão de todos os aços inoxidáveis depende bastante do estado de acabamento da superfície do metal, sendo tanto melhor quanto mais lisa ou mais polida estiver a superfície. Por esse motivo, em serviços de alta corrosão recomenda-se a remoção e esmerilhamento das irregularidades, o polimento da superfície e o arredondamento de arestas (SHACKELFORD, 2008).

Todos os aços inoxidáveis estão sujeitos ao fenômeno da corrosão-erosão, para valores muito altos de velocidades relativas de circulação de líquidos, recomendando-se velocidades máximas de três metros por segundo (m/s) (ASKELAND; PHULÉ, 2011).

3.4.1.1 Aços Inoxidáveis Austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam estrutura com ferro-gama ($Fe\gamma$) em qualquer temperatura, não tendo, assim, temperatura de transformação alfa-gama ($\alpha\gamma$). Não são, por isso, temperáveis, qualquer que seja o tratamento térmico efetuado. Esses aços podem sofrer transformação martensítica por um vigoroso encruamento (martelamento ou trabalho de deformação à frio), ou por têmpera em nitrogênio líquido, observando-se, nesse último caso, um ligeiro magnetismo (TELLES, 2003).

A estabilização da austenita, isto é, o alargamento do “*campo austenítico*” do diagrama da liga ferro-carbono (Fe-C) em qualquer temperatura, é conseguida pela adição dos elementos chamados “*gamágenos*”, que são, principalmente, o níquel, manganês e nitrogênio (N). Com o mínimo de 7% de níquel, consegue-se que o campo austenítico, em condição metaestável, seja abrangido praticamente toda a área do diagrama, eliminando praticamente a ferrita. Existe uma variedade muito grande de aços inoxidáveis austeníticos. A Tabela 3 mostra os aços mais comuns desse grupo.

Tabela 3 - Composição típica de aços inoxidáveis austeníticos

Designação AISI	Composição nominal (%)						
	Restante: Ferro						
	% C	% Mn	% Si	% Cr	% Ni	% N	% Mo
304	0,08	2,0	1,0	18,0 a 20,0	8,0 a 10,5	-	-
304L	0,03	2,0	1,0	18,0 a 20,0	8,0 a 12,0	-	-
304H	0,04	2,0	1,0	18,0 a 20,0	8,0 a 10,5	-	-
304N	0,08	2,0	1,0	18,0 a 20,0	8,0 a 10,5	0,01 a 0,16	-
310	0,15	2,0	1,0	24,0 a 26,0	19,0 a 22,0	-	-
316	0,08	2,0	1,0	16,0 a 18,0	10,0 a 14,0	-	2,0 a 3,0
316L	0,03	2,0	1,0	16,0 a 18,0	10,0 a 14,0	-	2,0 a 3,0
316H	0,04 a 0,1	2,0	1,0	16,0 a 18,0	10,0 a 14,0	-	2,0 a 3,0
316N	0,08	2,0	1,0	16,0 a 18,0	10,0 a 14,0	0,1 a 0,16	2,0 a 3,0
317	0,08	2,0	1,0	18,0 a 20,0	11,0 a 15,0	-	3,0 a 4,0
321	0,08	2,0	1,0	17,0 a 19,0	9,0 a 12,0	-	-
347	0,08	2,0	1,0	17,0 a 19,0	9,0 a 13,0	-	-
348	0,08	2,0	1,0	17,0 a 19,0	9,0 a 13,0	-	-

Fonte: Telles (2003)

Os aços austeníticos convencionais são certificados pelo AISI em dois grupos, denominados de “*série 300*” e “*série 200*”. A série 300, que é a mais importante, abrange os aços que possuem de 16 a 25% de cromo e 7 a 22% de níquel, tendo, alguns, pequenas quantidades de outros elementos de liga.

Nos aços da série 200, o níquel é parcialmente substituído pelo manganês, tendo esses materiais até 6% de níquel e 15% de manganês. Além dos aços convencionais agora referidos,

existem, ainda, numerosos outros aços especiais. De todos os aços austeníticos, o tipo 304 (vulgarmente denominado de “aço 18-8”) é o mais empregado na prática, por ser uma ótima combinação de excelente resistência à corrosão e custo não muito elevado, cabendo, por isso, a esse tipo, cerca de 50% de todas as aplicações de aços inoxidáveis em geral (CHIAVERINI, 2008). É o material tradicionalmente empregado em equipamentos de indústrias alimentícias, onde é necessário não só a resistência à corrosão, como também a não-contaminação dos produtos contidos.

Apesar de inoxidável, essa liga pode sofrer sensitização, ou seja, passar por um fenômeno onde os carbonetos de cromo se precipitam nos contornos de grão em vez de precipitar no interior dos grãos, causando o empobrecimento de cromo na vizinhança dos contornos de grão e com isso ter, nessas regiões, corrosões com grande intensidade, quando aquecida a temperaturas entre 480 e 860 graus celsius (°C) (ASKELAND; PHULÉ, 2011).

Em relação à quantidade de carbono, distinguem-se três grupos de aços austeníticos:

- Aços de carbono normal (até 0,08%) como, por exemplo, os tipos 304, 310, 316, 321 e 347, cujo valor mínimo de limite de resistência é de 53 kgf/mm²;
- Aços de baixo carbono (até 0,03%), como os tipos 304L e 316L ou aços de extra baixo carbono (até 0,02%), como os tipos 304ELC e 316ELC. Esses aços têm um limite de resistência inferior aos de carbono normal e, conseqüentemente, um limite de temperatura de uso também mais baixo. Apresentam, entretanto, melhor resistência à corrosão, em particular à corrosão intergranular;
- Aços de carbono controlado (tipos “H”), para os quais é especificado não só o limite máximo de carbono (0,10%), como também o limite mínimo (0,04%). Esses aços são, usualmente, submetidos à tratamento térmico de solubilização (solution annealing), para a obtenção de granulação grossa, com a finalidade de melhorar a resistência à fluência. Os aços tipo H são recomendados para serviços em temperaturas muito elevadas, acima de 600 °C, por exemplo.

Devido à estrutura austenítica que esses aços possuem em qualquer temperatura, são todos não-magnéticos e apresentam grande coeficiente de dilatação, em comparação com a média dos aços-carbono e outros aços ferríticos. Essa diferença de coeficientes de dilatação é um fato importante a ser considerado nos equipamentos que tenham partes em aços austeníticos

e partes em outros aços, principalmente quando as temperaturas são elevadas. A estrutura cristalina cúbica de face centrada do ferro γ apresenta melhor resistência à fluência do que a estrutura cúbica de corpo centrado do ferro α , e, por esse motivo, os aços inoxidáveis austeníticos têm todos grande resistência à fluência.

Todos os aços inoxidáveis austeníticos possuem, também, grande resistência à fadiga mecânica. São também aços mais fáceis de se deformar a frio (curvar, dobrar, etc), do que os demais aços inoxidáveis. A estrutura austenítica (como os outros metais de cristalização cúbica de face centrada) não apresenta temperatura de transição dúctil-frágil, sendo assim, teoricamente, imunes a fraturas frágeis, qualquer que seja a temperatura. Na realidade, os aços chamados austeníticos nem sempre possuem 100% da estrutura austenítica, podendo conter alguma quantidade de ferrita, em decorrência da composição química (maior presença de elementos que tendem a formar ferrita e/ou menor dos que tendem a formar austenita), da velocidade de resfriamento a partir do estado líquido, e de trabalhos de deformação.

Todos os aços inoxidáveis austeníticos são materiais de solda fácil, não sendo, em geral, necessário nenhum tratamento térmico das soldas. Para as soldas importantes, exige-se o exame com líquidos penetrantes para espessuras superiores a 19 milímetros (mm) e a radiografia total para as espessuras superiores a 32 milímetros. Como são materiais não-magnéticos, não é possível o exame com partículas magnéticas.

Os aços inoxidáveis austeníticos com estrutura cúbica de face centrada (CFC) possuem excelente ductibilidade, conformabilidade e resistência à corrosão. A resistência é obtida pelo endurecimento por solução sólida e podem ainda ser trabalhados a frio para aumentar a resistência mecânica. O efeito do encruamento é mais intenso nos aços inoxidáveis austeníticos que nos ferríticos.

3.4.1.2 Aços Inoxidáveis Ferríticos e Martensíticos

Os aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos têm, dependendo do tipo, de 12 a 30% de cromo. A maioria é isenta de níquel, tendo, alguns, pequena percentagem desse metal. São todos ligas magnéticas. Os aços ferríticos apresentam ferro-alfa ($Fe\alpha$) em qualquer temperatura, não possuem temperatura de transformação alfa-gama, e, por isso, não temperam, qualquer que seja

o tratamento térmico, podendo, entretanto, endurecer quando submetidos a trabalhos de deformação a frio.

Os aços martensíticos apresentam, tal como os aços-carbono, $Fe\alpha$, abaixo da temperatura de transformação e $Fe\gamma$ acima dessa temperatura. São, portanto, capazes de temperar, assim como os aços-carbono, podendo alcançar elevados valores de dureza e limite de resistência (até cerca de 190 kgf/mm^2) (TELLES, 2003). Existem, ainda, os aços inoxidáveis de estrutura mista, ferrítico-martensítica, que são capazes de têmpera parcial. A Tabela 4 mostra a composição típica dos principais tipos de aços desses grupos, com a designação numérica do AISI.

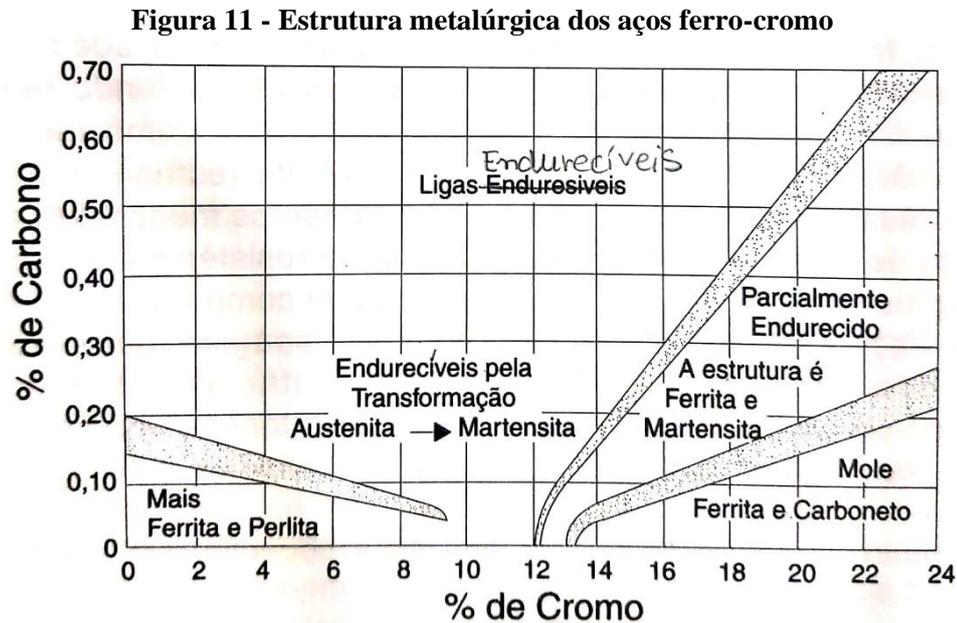
Tabela 4 - Composição típica de aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos

Designação AISI	Estrutura Metalúrgica	Composição nominal (%)						
		Restante: Ferro						
		% C	% Mn	% Si	% Cr	% Ni	% Al	% Mo
403	Martensítico	0,15	1,0	1,0	11,5 a 13,0	-	-	-
405	Ferrítico	0,08	1,0	1,0	11,5 a 14,5	0,6	0,1 a 0,3	-
410	Martensítico	0,15	1,0	1,0	11,5 a 13,5	0,75	-	-
410S	Ferrítico	0,08	1,0	1,0	11,5 a 13,5	0,6	-	-
416	Martensítico	0,15	1,0	0,5	12,0 a 14,0	-	-	0,6
420	Martensítico	0,15	1,0	1,0	12,0 a 14,0	-	-	-
429	Martensítico-ferrítico	0,12	1,0	1,0	14,0 a 16,0	0,75	-	-
430	Ferrítico	0,12	1,0	1,0	16,0 a 18,0	0,75	-	-
431	Martensítico-ferrítico	0,20	1,0	1,0	15,0 a 17,0	1,5	-	-
440	Martensítico	0,60	1,0	1,0	16,0 a 18,0	0,75	-	-
442	Ferrítico	0,20	-	-	18,0 a 23,0	-	-	-
446	Ferrítico	0,35	-	-	23,0 a 27,0	-	-	-

Fonte: Telles, (2003)

O tipo de estrutura do aço depende, basicamente, das percentagens de carbono e cromo presentes. A Figura 11 mostra os campos de estrutura ferrítica, martensítica ou mista das ligas ferro-cromo. De um modo geral, os aços ferríticos têm uma relação % de cromo / % de carbono maior que os martensíticos. Como pode ser observado na Tabela 4, os inoxidáveis ferríticos possuem uma quantidade de cromo superior a 11%, sendo os tipos 442 (no mínimo 18%) e 446 (no mínimo 23%) os que têm quantidade mais elevada. A adição de pelo menos 12% de cromo

(sem a adição simultânea de elementos formadores de ferro γ) suprime completamente o campo austenítico, tornando a liga ferrítica em qualquer temperatura (CHIAVERINI, 2008). De fato, para o aço ser completamente ferrítico, é necessária uma quantidade maior de cromo, porque parte do carbono combina-se com o cromo, reduzindo o teor de cromo livre.



A maioria dos aços martensíticos (tipos 403, 410, 416 e etc) tem quantidade de cromo inferior a 14%. Os tipos 431 e 440 possuem, excepcionalmente, quantidade de cromo mais elevado, devido às altas percentagens de carbono presentes. Alguns tipos (tipos 420 e 455, por exemplo) são endurecíveis por envelhecimento (age hardening). Os tipos 405 e 410S têm estrutura ferrítica, apesar da baixa quantidade de cromo. O primeiro, devido à presença de alumínio, que estabiliza a ferrita, e o segundo, devido à percentagem muito pequena de carbono. A Figura 11 abrange também os aços-liga cromo, que apresentam estrutura martensítica, temperável.

A resistência mecânica em temperaturas elevadas e a resistência à fluência desses aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos são comparáveis com as resistências dos aços de baixa liga, sendo a resistência à fluência sensivelmente inferior à dos inoxidáveis austeníticos. Por esse motivo, as temperaturas máximas limites de uso prático são também inferiores às dos aços austeníticos, como mostra a Tabela 4.

Tanto os aços inoxidáveis ferríticos quanto os martensíticos têm um comportamento, em baixas temperaturas, semelhante ao do aço-carbono, estando, também, sujeitos a fraturas frágeis, cuja possibilidade de ser considerada para temperaturas inferiores a 15 °C, principalmente para peças de grande espessura ou muito tensionadas. O coeficiente de dilatação desses aços tem um valor próximo do coeficiente dos aço-carbono e aços de baixa liga, não havendo, portanto, problemas de dilatação diferencial em estruturas mistas, mesmo para altas temperaturas.

Nos aços que possuem mais de 17% de cromo, pode também haver formação de “*fase sigma*”, quando aquecidos por algum tempo na faixa de temperaturas entre 560 °C e 900 °C, sendo essa tendência tanto maior quanto maior for a percentagem de cromo no aço. Para um aço com 26% de cromo, a fase sigma pode se formar em dez horas a 650 °C, enquanto esse tempo se reduz a dez minutos para um aço com 35% de cromo (TELLES, 2003).

A formação de fase sigma nos aços ferríticos é bem mais rápida e mais provável que nos aços austeníticos. Mesmo assim, não há qualquer perigo como consequência do aquecimento em tratamentos térmicos. Como foi mencionado anteriormente, o aparecimento de uma quantidade significativa de fase sigma fragiliza gravemente os aços, podendo a peça metálica partir-se em estilhaços pela simples queda ao chão. Embora esse fenômeno seja causado pela exposição a temperaturas elevadas, o comportamento frágil somente se manifesta em temperaturas abaixo de 260 °C. Por isso, o risco de fraturas frágeis existe, principalmente durante os períodos de parada de operação, quando a temperatura do equipamento fica inferior a esse valor.

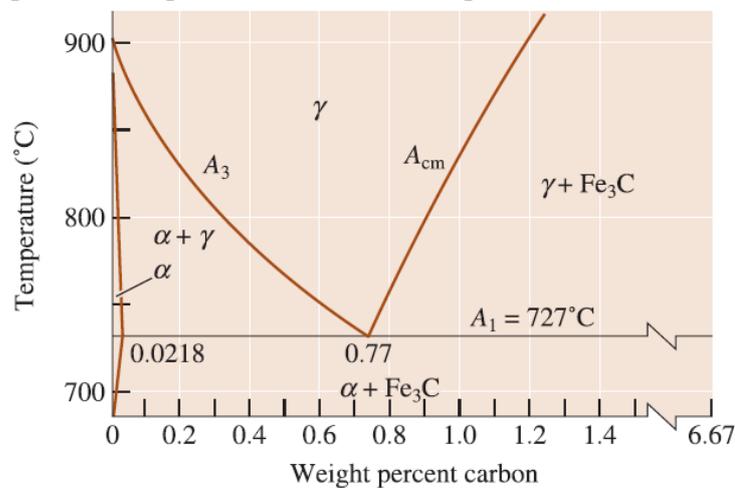
Os aços inoxidáveis ferríticos têm um crescimento exagerado de grãos para temperaturas acima da faixa de 900 °C a 950 °C, o que também fragiliza severamente o material. Esses aços apresentam, também, um fenômeno de precipitação de carbonetos e nitretos de cromo (sensitização) por um mecanismo análogo ao que ocorre com os aços austeníticos. A sensitização nesses aços também pode resultar em corrosão intergranular, sem, entretanto, afetar a resistência mecânica, sendo de notar que o número de meios capazes de provocar a corrosão intergranular nesses aços é bem menor que para os aços austeníticos e, por isso, o fenômeno é mais raro de ocorrer. A sensitização acontece em temperaturas mais altas (cerca de 925 °C), necessitando, entretanto, menos tempo do que para os aços austeníticos. O fenômeno

é independente da quantidade de cromo. Embora menos acentuadamente do que nos aços austeníticos, a redução na quantidade de carbono também diminui a tendência à sensitização.

3.4.2 Transformações de Fases nos Aços

Para os aços, a região da reação eutetóide, mostrada em ênfase na Figura 12, do diagrama de equilíbrio mostrado na Figura 13 apresenta enorme importância. Dessa forma, as linhas de solubilidade e a temperatura eutetóide estão identificadas de forma especial. Assim, a curva A_3 mostra a temperatura na qual a ferrita começa a se formar a partir do resfriamento da austenita, a curva A_{cm} mostra a temperatura na qual a cementita (Fe_3C) começa a se formar a partir do resfriamento da austenita e reta A_1 é a temperatura eutetóide. As retas A_0 e A_2 indicam as temperaturas acima das quais a cementita e a ferrita deixam de ser magnéticas, respectivamente, e é também chamada de ponto “Curie”.

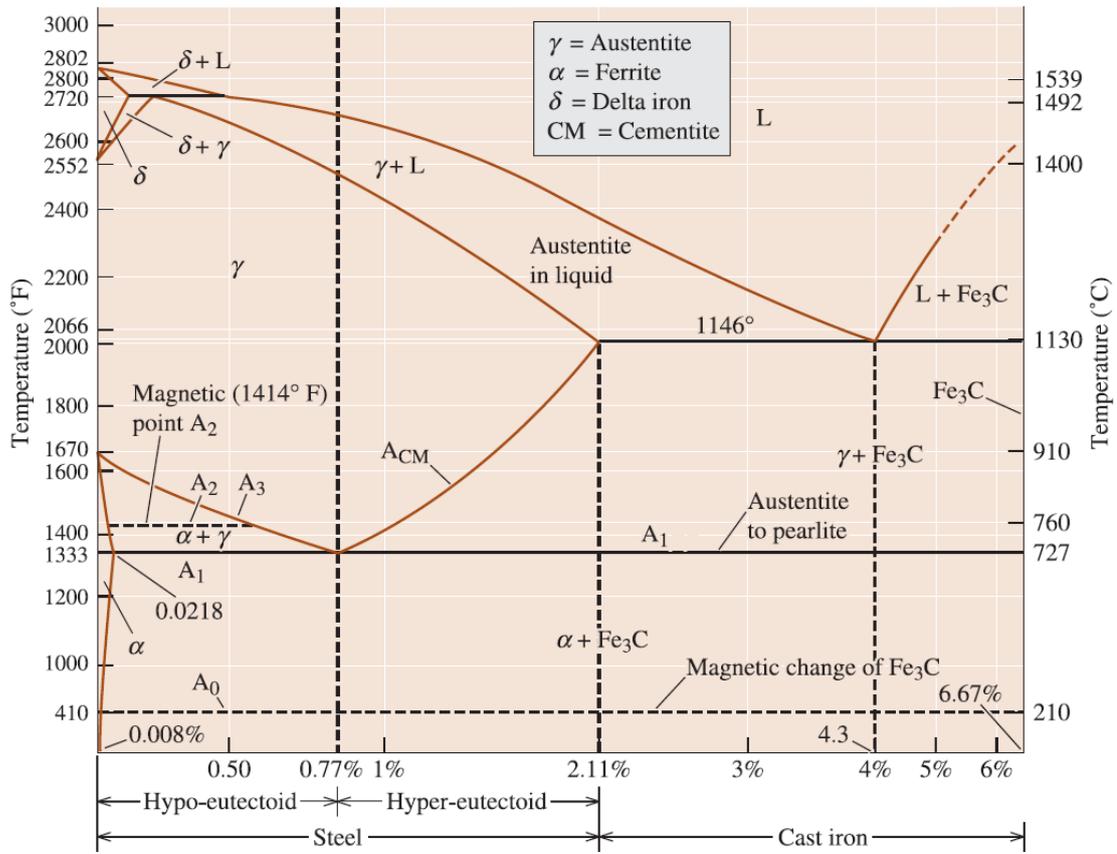
Figura 12 - Região do eutetóide do diagrama de fases Fe- Fe_3C



Fonte: Askeland; Fulay (2009)

Quase todos os tratamentos térmicos são realizados para produzir uma combinação de ferrita e cementita que proporcione propriedades interessantes.

Figura 13 - Versão modificada do diagrama ferro-carbono



Fonte: Askeland; Fulay (2009)

3.4.3 Tratamentos Térmicos de Aços

Os procedimentos convencionais de tratamento térmico para a produção de aços martensíticos envolvem normalmente o resfriamento rápido e contínuo de uma amostra austenitizada em alguma meio de têmpera, tal como a água, o óleo ou o ar. As propriedades ótimas de um aço que foi temperado e então revenido só podem ser obtidas se, durante o tratamento térmico por têmpera, a amostra tiver sido convertida a um alto teor de martensita.

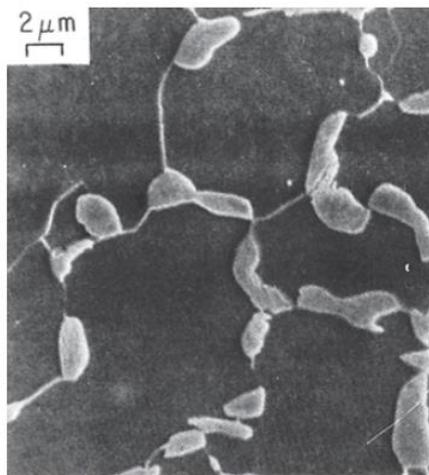
A formação de qualquer perlita e/ou bainita resultará em uma combinação que não é a melhor combinação de características mecânicas. Durante o tratamento por têmpera, é impossível resfriar toda a amostra em uma taxa uniforme, pois a superfície sempre resfriará mais rapidamente que as regiões internas. Portanto, a austenita irá se transformar ao longo de uma faixa de temperaturas, produzindo uma possível variação da microestrutura e das propriedades em função da posição no interior de uma amostra.

O sucesso de uma tratamento térmico de aços para produzir uma microestrutura predominantemente martensítica em toda a seção transversal depende principalmente da composição da liga, do tipo e natureza de meio de têmpera e do tamanho e forma da amostra (NOVICKA; PAPCUN; ZOLOTOVA, 2016).

3.4.3.1 Tratamento Térmico de Aços Bifásicos

Os aços bifásicos contêm uma distribuição uniforme de ferrita e martensita, com a martensita dispersa proporcionando limite de escoamento de 415 a 1.000 megapascals (MPa). Esses aços possuem baixo teor de carbono e não contêm elementos de liga em quantidades suficientes para se obter uma boa temperabilidade com os processos normais de têmpera. Entretanto, quando o aço encontra-se na região bifásica de ferrita e austenita do diagrama de fases, a austenita enriquece em carbono e isso permite uma boa temperabilidade apenas desta fase. Durante a têmpera, somente a região de austenita se transforma em martensita, resultando numa microestrutura bifásica, conforme mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Microestrutura de um aço bifásico com ilhas de martensita finas em uma matriz de ferrita (aumento original de 2500^x)



Fonte: Novicka; Papcun; Zolotova (2016)

Combinações não usuais de propriedades podem ser obtidas num aço cuja microestrutura bifásica contenha determinadas percentagens de ferrita e de martensita. A martensita proporciona resistência mecânica e a ferrita assegura tenacidade. Para obter uma mistura de ferrita e martensita, é preciso tratar termicamente o aço hipoeutetóide em uma região $\alpha+\gamma$ do diagrama de fases, conforme mostrado na Figura 13.

O aço é então temperado para permitir que a fração γ não transformada se transforme em martensita. A temperatura do tratamento térmico é determinada para assegurar que a martensita tenha a percentagem de carbono desejada. A partir da linha de solubilidade na região $\alpha+\gamma$, verifica-se a temperatura correspondente a essa percentagem. Para produzir um aço com a percentagem de martensita desejada, é necessário selecionar um aço que forneça essa mesma percentagem de austenita quando mantido à temperatura correspondente da linha de solubilidade na região $\alpha+\gamma$. Pode-se assim calcular a percentagem de fase γ , de acordo com a Equação 2 (ASKELAND; PHULÉ, 2011):

$$\% \gamma = \frac{(\% C_{\text{aço}} - 0,02)}{(\% C_{\text{martensita}} - 0,02)} \times 100 \quad (2)$$

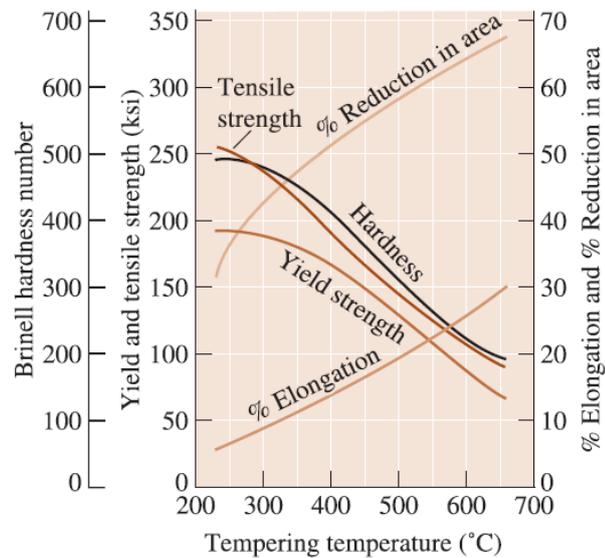
Na Equação 2, $\% C_{\text{aço}}$ é o teor de carbono do aço e $\% C_{\text{martensita}}$ é a percentagem de carbono da martensita. Os critérios de escolha do aço são:

- Selecionar um aço hipoeutetóide com a percentagem de fase γ especificada de acordo com a Equação 2;
- Aquecer o aço até a temperatura correspondente da linha de solubilidade na região $\alpha+\gamma$ e manter essa temperatura por uma hora, dependendo da espessura da peça, para produzir uma microestrutura de equilíbrio com uma percentagem da massa desejada sob a forma de ferrita e a outra percentagem sob a forma de austenita com a suposta percentagem de carbono que se deseja obter de martensita ($\% C_{\text{martensita}}$);
- Temperar o aço até a temperatura ambiente. Toda a austenita se transforma em martensita, com percentual de martensita ($\% C_{\text{martensita}}$), e a ferrita primária se mantém inalterada.

3.4.3.2 Têmpera e Revenido

A têmpera endurece a maioria dos aços, e o revenido aumenta a tenacidade. Esse procedimento já é empregado para as ligas ferrosas há milhares de anos. Pode-se obter uma distribuição bastante fina de cementita e ferrita, conhecida como martensita revenida, com tratamento térmico de revenido de martensita. Durante o revenido forma-se uma mistura de ferrita e cementita a partir da martensita. O tratamento de revenido determina as propriedades finais do aço temperado, conforme exemplo mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Efeito da temperatura de revenido nas propriedades do aço



Fonte: Novicka; Papcun; Zolotova (2016)

3.4.3.3 Severidade da Têmpera

A severidade da têmpera é um termo usado com frequência para indicar a taxa de resfriamento (CALLISTER, 2012). Quanto mais rápido for o resfriamento, mais severa será a têmpera. Dentre os três meios de têmpera mais comuns (água, óleo e ar), a água produz o resfriamento mais severo, seguida do óleo, que por sua vez é mais eficaz que o ar. O grau de agitação de cada meio também influencia a taxa de remoção de calor. O aumento da velocidade do meio de resfriamento ao longo da superfície da amostra melhora a eficiência da têmpera. As têmperas em óleo são adequadas para o tratamento térmico de muitos aços-liga. De fato, para os aços com maiores teores de carbono, a têmpera em água é muito severa, pois podem ser produzidas trincas ou podem ocorrer empenamento.

Ao usar curvas de transformação tempo-temperatura (TTT), considera-se possível resfriar instantaneamente a temperatura de austenitização até a temperatura de transformação. Como isso não ocorre na prática, pode surgir a formação de microconstituintes indesejados durante o processo de têmpera. Por exemplo, a perlita pode se formar à medida que a curva de resfriamento do aço intercepta o joelho da curva TTT. A taxa de resfriamento durante a têmpera depende de diversos fatores. Em primeiro lugar, a superfície sempre resfria mais rapidamente do que o centro da peça. Além disso, à medida que o tamanho do componente aumenta, a taxa de resfriamento é mais lenta. Finalmente, a taxa de resfriamento depende da temperatura e das características de transferência de calor do meio de têmpera, conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Coeficiente H ou severidade de têmpera para diversos meios de resfriamento

Meio	Coeficiente H	Taxa de resfriamento no centro da barra de 2,5 cm ($^{\circ}\text{C/s}$)
�leo (sem agita�o)	0,25	18
�leo (com agita�o)	1,0	45
H ₂ O (sem agita�o)	1,0	45
H ₂ O (com agita�o)	4,0	190
Salmoura (sem agita�o)	2,0	90
Salmoura (com agita�o)	5,0	230

Fonte: Askeland; Phulé (2011)

A têmpera em óleo, por exemplo, produz um coeficiente de transferência de calor “ H_t ” menor que o resfriamento obtido no resfriamento em água ou salmoura. A agita o do meio refrigerante rompe a cobertura de vapor que se forma na interface metal-líquido refrigerante. Com o uso da água como meio de têmpera, a agita o melhora a transferência de calor ao provocar o contato de líquido mais frio com as superfícies que estão sendo temperadas.

Durante a têmpera de uma amostra de aço, a energia térmica deve ser transportada para a superfície antes que possa ser dissipada no meio de têmpera. Como consequência, a taxa de resfriamento no interior de uma estrutura de aço varia de acordo com a posi o e depende da geometria e do tamanho da estrutura.

No que se refere à forma da amostra, uma vez que a energia térmica é dissipada para o meio de têmpera na superfície da amostra, a taxa de resfriamento para um tratamento por têmpera específico depende da razão entre a área da superfície e a massa da amostra. Quanto maior for essa razão, mais rápida será a taxa de resfriamento e, conseqüentemente mais profundo será o efeito de endurecimento. As formas irregulares com arestas e cantos apresentam maiores razões superfície-massa que as formas regulares e arredondadas (por exemplo, esferas e cilindros) e são, dessa forma, mais suscetíveis ao endurecimento por têmpera.

Inúmeros aços são suscetíveis a um tratamento térmico para formar martensita, e um dos critérios mais importantes no processo de sele o é a temperabilidade. As curvas de temperabilidade, quando usadas em conjunto com gráficos de taxa de resfriamento em fun o do diâmetro em posi es na superfície, podem ser usadas para garantir a adequa o de um aço

específico para uma dada aplicação. Ou, de maneira inversa, pode ser determinada a adequação de um procedimento de têmpera para uma dada liga. Para peças que deverão ser empregadas em aplicações envolvendo tensões relativamente elevadas, um mínimo de 80% de martensita deve ser produzido em todo o interior do material, em consequência do procedimento de têmpera. Um mínimo de apenas 50% é necessário para as peças submetidas a tensões moderadas.

Da mesma maneira que, para amostras cilíndricas de aços que foram temperadas, a dureza superficial depende não apenas da composição da liga e do meio da têmpera, mas também do diâmetro da amostra, as características mecânicas de amostras de aço que foram temperadas e subsequentemente revenidas também serão uma função do diâmetro da amostra.

3.5 ESPECIFICAÇÃO DE PRODUTO E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

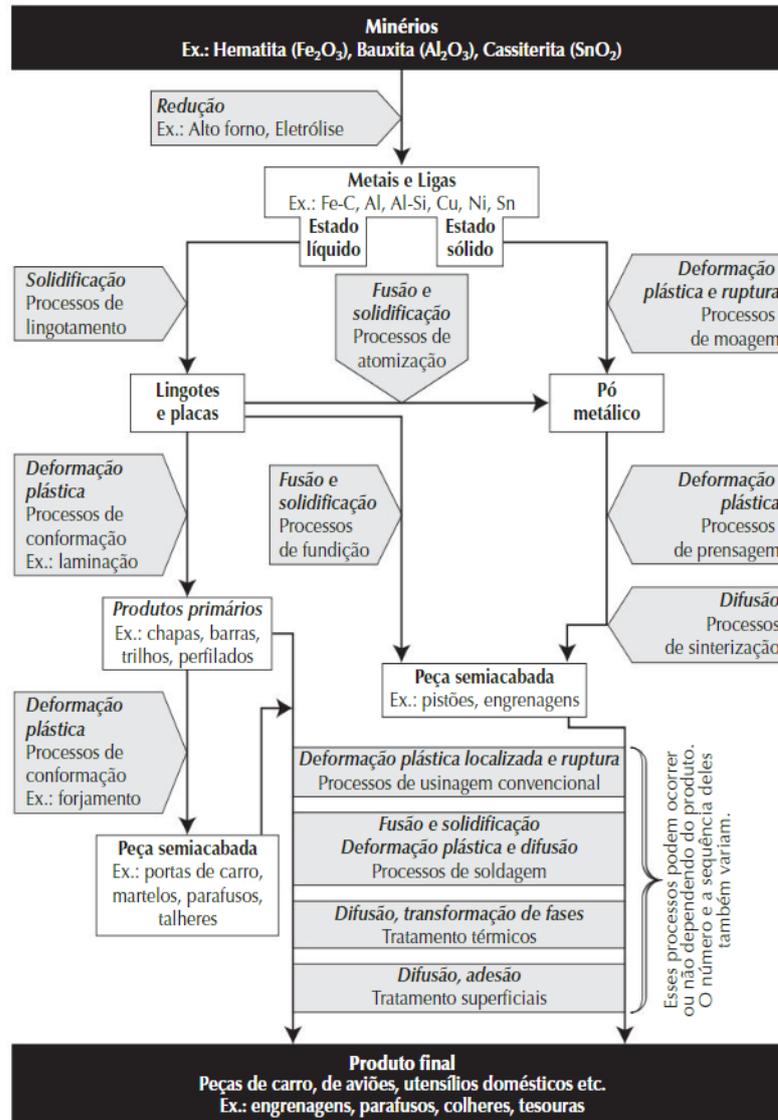
Para a fabricação de produtos metálicos são usados processos que visam dar forma (geometria, dimensões, acabamento superficial) ao metal puro ou liga metálica com as especificações estabelecidas para o produto, e também conferir a este o conjunto de propriedades (resistência mecânica, dureza, resistência ao desgaste, resistência à corrosão, condutividade elétrica, densidade, etc.) exigido para o seu bom desempenho.

A forma do produto metálico pode ser diversa, com geometria simples ou complexa, com dimensões pequenas ou grandes, com precisão dimensional bastante ou pouco rigorosa, com acabamento superficial bastante fino ou sem nenhuma exigência de controle. Os produtos podem envolver um só tipo de material e poucos processos diferentes para a sua fabricação, como também envolver vários materiais, várias peças e vários processos diferentes. Podem ser envolvidos operações de processamento, que visam dar forma e controlar a microestrutura e propriedades da peça, e operações de montagem, que unem diversas partes (ASHBY, 1995). De maneira geral, a fabricação de um determinado produto envolve uma sequência de processos metalurgicamente distintos, mas interdependentes, pois o histórico térmico e mecânico do material em processos anteriores influencia os posteriores.

Assim sendo, existe uma relação complexa e importante a ser considerada para a seleção do material e da rota de processamento, que é a relação entre as especificações do produto (forma, propriedades), metal ou composição da liga e os processos de fabricação. A Figura 16

apresenta esquematicamente um fluxograma de rotas de fabricação dos produtos metálicos no qual os fenômenos metalúrgicos, os processos e alguns exemplos de produtos das diversas etapas de fabricação são apresentados.

Figura 16 - Fluxograma de rotas para fabricação de produtos metálicos



Fonte: Ashby (2007)

3.5.1 Operações de Conformação

As operações de conformação são aquelas em que a forma de uma peça metálica é alterada por deformação plástica. Obviamente, a deformação deve ser induzida por uma força ou tensão externa, resultado do uso de uma ferramenta, geralmente um matriz, cuja magnitude deve exceder o limite de escoamento do material (CALLISTER, 2012). O metal, então, deforma e toma a forma determinada em parte ou quase totalmente pela geometria da matriz. A maioria

dos materiais metálicos é especialmente suscetível a esses procedimentos, sendo pelo menos moderadamente dúcteis e capazes de sofrer alguma deformação permanente sem trincar ou fraturar. Podem ser classificados em duas categorias:

- Processos de conformação de volumes: são caracterizados por significativa quantidade de deformações e grandes mudanças de forma. A razão área superficial/volume da peça é relativamente pequena. Nessa categoria, estão os processos de laminação, forjamento, extrusão e trefilação;
- Processos de conformação em chapas: conformação e operações correlatas em chapas, bobinas e tiras. A razão área superficial/volume da peça é alta. São operações sempre realizadas “*a frio*” em que se utiliza um conjunto de ferramentas denominadas matriz e punção. Nessa categoria estão os processos de dobramento, estampagem profunda e corte por estampagem.

Quando a deformação é obtida em uma temperatura acima daquela na qual ocorre a recristalização, o processo é denominado trabalho a quente. De maneira contrária, o processo é um trabalho a frio. Para a maioria das técnicas de conformação, tanto o procedimento de trabalho a quente quanto o de trabalho a frio são possíveis. Nas operações de trabalho a quente, grandes deformações são possíveis, e podem ser repetidas sucessivamente, já que o metal permanece macio e dúctil. Além disso, as exigências em relação à energia de deformação são menores que no trabalho a frio. O trabalho a frio produz aumento na resistência com consequente diminuição na ductibilidade, uma vez que o metal encrua.

As vantagens em relação ao trabalho a quente incluem melhor qualidade do acabamento superficial, melhores propriedades mecânicas e maior variedade dessas propriedades e controle dimensional mais preciso da peça acabada (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2015). Ocasionalmente, a deformação total é obtida em uma série de etapas, onde a peça é sucessivamente submetida a pequenas magnitudes de trabalho a frio e, então, a um recozimento intermediário.

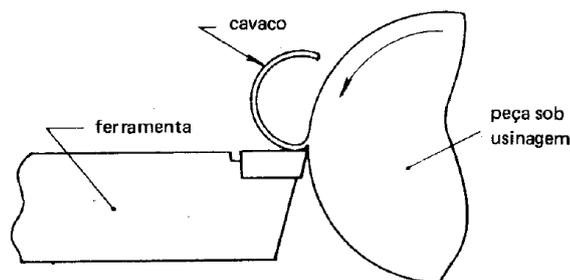
3.5.2 Usinagem

As peças metálicas fabricadas pelos processos metalúrgicos convencionais, como fundição, forjamento, entre outros, geralmente apresentam superfícies grosseiras e que,

portanto, exigem um determinado acabamento. Por outro lado, os processos citados nem sempre permitem obter certas peculiaridades, como determinados tipos de saliências e reentrâncias, furos rosqueados e furos passantes, por exemplo. Finalmente, para alguns tipos de peças, os processos de fabricação convencionais não apresentam as melhores condições de custo e produtividade (CHIAVERINI, 1986).

Usinagem é o conjunto de processos de manufatura nos quais uma ferramenta de corte é usada para remover excesso de material (cavaco) de um sólido, de tal maneira que o material remanescente tenha a forma da peça desejada. A ação predominante da usinagem envolve deformação por cisalhamento e ruptura do material para formar um cavaco. À medida que o cavaco é removido, uma nova superfície é formada (FERRARESI, 2003). Esse processo é mostrado na Figura 17.

Figura 17 - Representação esquemática do processo de usinagem



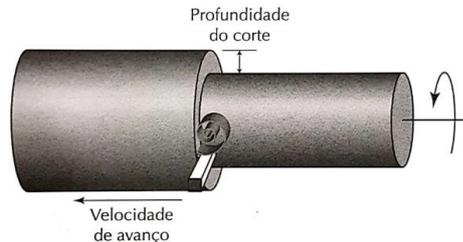
Fonte: Chiaverini (1986)

A usinagem pode ser dividida em processos de corte, que geralmente envolvem ferramentas mono e multicortantes (torneamento, furação, fresamento, corte por serra, aplainamento), processos abrasivos (retificação, usinagem ultrassônica) e processos avançados de usinagem, que usam fontes de energia elétrica, química, térmica, hidrodinâmica e combinações dessas para remover o material da peça (eletroerosão, feixe de elétrons, usinagem eletroquímica, corte com jato d'água e abrasivos).

Nos processos de corte, as variáveis independentes envolvidas e que podem ser controladas são o tipo de ferramenta de corte (com as suas propriedades, forma, acabamento e acabamento superficial), o material a ser usinado (com suas propriedades e temperatura em que será usinado), tipo de fluido de corte e condições de corte (como velocidade da ferramenta em relação à superfície da peça ou velocidade de avanço, quantidade de material removido por

ciclo ou profundidade de corte e velocidade de repetição do ciclo de corte), conforme mostrado na Figura 18.

Figura 18 - Representação esquemática das condições de corte do processo de usinagem



Fonte: Ferraresi (2003)

3.5.3 Soldagem

Soldagem é um conjunto de processos de manufatura pelos quais duas partes metálicas são unidas permanentemente pela coalescência da interface de contato, que é induzida pela combinação de temperatura, pressão e condições metalúrgicas (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2015). Para CHIAVERINI (1986), soldagem é o processo de juntar peças metálicas, colocando-as em contato íntimo, e aquecer as superfícies de contato de modo a levá-las a um estado de fusão ou de plasticidade.

A expressão solda é usada para designar o resultado da operação. A ação de aproximação e aquecimento, plasticidade ou fusão parcial, leva a fenômeno de difusão na zona soldada, dando como resultado, a junta (solda), que se caracteriza por sua resistência e que se torna perfeitamente coesa depois que o material resfria. Para CALLISTER (2012), em certo sentido, a soldagem pode ser considerada uma técnica de fabricação, onde a ligação da união é metalúrgica, em vez de ser simplesmente mecânica.

A escolha do processo de soldagem depende de vários fatores, como a aplicação, o projeto da solda, os materiais envolvidos e a forma dos componentes que serão soldados, sua espessura e seu tamanho. Os processos de soldagem podem ser classificados de acordo com a fonte de energia empregada para aquecer os metais (mecânica, química, elétrica e radiante) e a condição do metal nas superfícies de contato, sendo divididos em quatro classes:

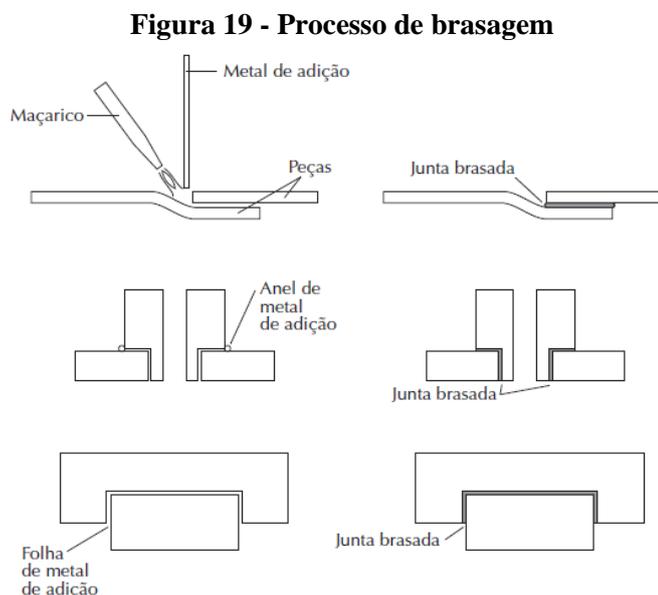
- Soldagem por fusão: processos que utilizam a fusão parcial dos materiais das peças envolvidas na união;

- Soldagem no estado sólido: são processos nos quais não ocorre fusão dos materiais envolvidos;
- Brasagem: processos nos quais ocorre a fusão somente dos materiais de adição e não das peças a serem unidas, nesse caso, a temperatura de fusão está acima de 450 °C;
- Solda branda: mesmo princípio da brasagem, mas, nesse caso, a temperatura de fusão dos materiais de adição está abaixo de 450 °C.

3.5.3.1 Brasagem

Consiste na soldagem de metais e ligas metálicas de natureza diferente pela adição de um metal ou liga de enchimento entre os mesmos, sem que ocorra fusão dos metais base, mas somente do metal de enchimento, nem o elevado aquecimento da zona adjacente à região da solda. O material manterá sua natureza estrutural e conseqüentemente suas propriedades mecânicas originais (WAINER; BRANDI; DE MELLO, 2013).

O metal de enchimento ou adição possui, sempre, um ponto de fusão inferior aos dos metais a serem juntados, geralmente acima de 450 °C. A brasagem, também chamada de “*solda forte*”, é geralmente realizada a temperaturas superiores a 427 °C (CHIAVERINI, 1986). O material de adição flui por capilaridade à medida que a distância entre as superfícies a serem unidas é menor que 0,5 milímetros (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2015). O processo de brasagem é mostrado esquematicamente na Figura 19.



Fonte: Kiminami; Castro; Oliveira (2015)

A escolha do metal de adição é baseada no seu ponto de fusão e nas propriedades de resistência mecânica, resistência à corrosão e custo. Para a brasagem de peças de metais ferrosos, os metais de adição usados são as ligas não ferrosas, comumente, as ligas à base de cobre e as de prata.

A fusão do metal de adição pode ser feita por tocha (maçarico) de oxi-gás ou em forno. As peças a serem unidas, com fluxo e metal de adição posicionado adequadamente na região da junta, são colocadas no forno à temperatura superior à de fusão do metal de adição. Também existem outras possibilidades de aquecimento, como por indução ou por resistência elétrica da própria peça a ser brasada.

A preparação prévia das superfícies das peças a serem brasadas é necessária para garantir a “*molhabilidade*” do metal de enchimento sobre o metal de base, e permitir sua penetração e aderência na junta. Isto é obtido com a retirada de resíduos de óxido e outras sujidades da superfície por meios mecânicos e químicos. Durante o processo, também a junta deve ser protegida da oxidação.

Nesse processo também são usados fluxos, geralmente bórax ou ácido bórico, fluoretos, cloretos, iodetos e brometos, aplicados na forma de pasta, pó ou líquido. As funções dos fluxos são proteger a superfície do metal de base da oxidação ou evitar contaminação durante a soldagem, prevenir perda de elementos com baixa pressão de vaporização, aumentar a condutividade térmica da junta e permitir que o metal líquido molhe mais facilmente a superfície do metal de base. Para evitar problemas de corrosão, as sobras de fluxos devem ser removidas após a brasagem.

3.6 CORROSÃO E PREVENÇÃO

A corrosão é o fenômeno de deterioração e perda de material devido a modificações químicas e eletrônicas que ocorrem por reações com o ambiente. A corrosão, além de provocar a falha direta dos metais quando em serviço, torna-os suscetíveis ao rompimento por algum outro mecanismo. O ferro e suas ligas são os materiais de construção mecânica mais importantes e também os mais sujeitos e mais sensíveis à ação do meio corrosivo. É natural, pois, que os fenômenos relacionados com a corrosão do ferro sejam os mais estudados e o mais

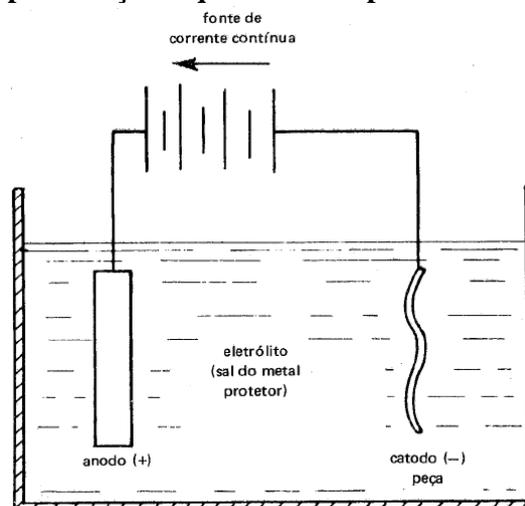
conhecidos. O tipo mais comum de corrosão do ferro envolve o processo eletroquímico de oxidação metálica (VAN VLACK, 1964).

Para que haja corrosão ou enferrujamento do ferro, é necessário que estejam presentes tanto umidade quanto oxigênio. Em outras palavras, não haverá corrosão do ferro se o mesmo estiver mergulhado em água sem a presença de oxigênio, do mesmo modo que não haverá corrosão se o ferro estiver exposto ao ar contendo apenas oxigênio, sem a presença de umidade. A prevenção contra a corrosão pode ser advinda de diversos meios, seja pela escolha apropriada de metais e ligas que se caracterizam por resistirem à corrosão, pela alteração do ambiente, pelo emprego de revestimentos superficiais, os quais constituem uma película protetora que separa o meio ambiente do metal-base, ou por proteção catódica.

3.6.1 Eletrodeposição

É o processo de revestimento metálico mais empregado, pois por seu intermédio consegue-se camadas superficiais de espessura fina, uniformes e isentas de poros. Os metais comumente depositados por essa técnica são zinco, estanho, cobre, níquel, cromo, cádmio, prata e ouro. A peça a ser revestida é usada como um cátodo numa célula eletrolítica (ou cuba eletrolítica), onde o eletrólito contém sal do metal protetor, podendo o ânodo ser do mesmo metal a ser depositado. Em alguns casos, como na eletrodeposição do cromo, usam-se ânodos insolúveis de chumbo, contendo em geral adições de antimônio ou estanho (VAN VLACK, 1964). O princípio do processo de eletrodeposição está representado na Figura 20.

Figura 20 - Representação esquemática do processo de eletrodeposição



Fonte: Van Vlack (1964)

Em princípio, a eletrodeposição é um fenômeno inverso ao da corrosão, isto é, enquanto na corrosão o metal é dissolvido na solução, na eletrodeposição o metal é depositado na solução. A eficiência do processo depende de diversas variáveis que devem ser rigorosamente controladas, como a composição química do eletrólito, temperatura, densidade da corrente do cátodo, entre outras. Controlando adequadamente essas variáveis, tem-se uma distribuição uniforme do revestimento na superfície das peças.

3.6.1.1 Eletrodeposição de Níquel

A eletrodeposição de níquel, com ou sem camada subjacente de cobre, constitui um dos processos mais antigos e utilizados para proteção contra a corrosão e para fins decorativos, em aço, latão e outros metais e ligas. Os revestimentos de níquel para fins gerais são produzidos com banhos de sulfato de níquel, cloreto de níquel, fluoboratos e sulfamatos de níquel. São utilizados principalmente para proteger ligas de ferro, cobre ou zinco, em atmosferas industriais, marítimas e rurais. Os revestimentos de níquel para fins especiais são produzidos com banhos de sulfato e cloreto de níquel e ácido bórico. Caracterizam-se por sua grande dureza (CHIAVERINI, 1986).

Os revestimentos de níquel preto são derivados de banhos contendo cloreto e sulfato de níquel, cloreto e sulfato de zinco, principalmente. Sua qualidade protetora não é muito grande, sendo usados para obtenção de um acabamento escuro, decorativo e não refletor. Finalmente, os revestimentos de níquel brilhante, para fins decorativos principalmente, são obtidos a partir de banhos contendo sulfato de níquel, cloreto de níquel e ácido bórico como principais componentes.

3.7 METODOLOGIA DO PROJETO DE ENGENHARIA REVERSA

A metodologia de Engenharia Reversa consiste no estudo de um objeto, desmontando-o e analisando suas peças e componentes, a fim de descobrir as cotas presentes, transformando-as em fichas técnicas. Essa técnica é realizada para descobrir como o objeto foi fabricado, como ele poderia ser melhorado e que outras funções ele poderia realizar. Especificamente em relação ao projeto, a metodologia de Engenharia Reversa foi realizada com a finalidade de verificar as dimensões do dispositivo já existente, e como estas poderiam ser alteradas, com o

intuito de identificar possíveis oportunidades de melhoria, e com isso melhorar a performance do mesmo.

3.8 METODOLOGIA DE PROJETO DE ANÁLISE ESTRUTURAL

A análise estrutural é o estudo e a determinação das cargas atuantes sobre uma determinada estrutura e seus subcomponentes (NORTON, 2013). Através de conhecimentos em mecânica aplicada, ciência dos materiais e métodos numéricos, é possível obter a distribuição de tensão na estrutura, dado um critério de falha adequado, deformações, forças internas, acelerações e tempo de vida útil, fixada uma carga útil. Com isso, a análise estrutural é parte fundamental de um projeto mecânico de estruturas. Especificamente em relação ao projeto, a análise estrutural foi realizada com a finalidade de também verificar esforços presentes durante a operação do dispositivo e quais dos componentes são mais preocupantes, no tocante a possibilidade de ocorrências de falhas em suas estruturas.

3.8.1 Análise Estrutural do Conjunto Extrator

A peça ou dispositivo, qualquer que seja, para a análise estrutural por método dos elementos finitos (MEF), nada mais é que o domínio (nesse caso, em três dimensões), dividido em elementos. Cada elemento é uma "pequeno segmento" do domínio, sendo o termo "pequeno" uma escolha que envolve diversos fatores, como precisão desejada, curvatura da peça, etc.

Usualmente elementos são tetraedros ou hexaedros, onde cada um dos vértices do elemento é um "nó". São nestes nós que são calculadas as equações diferenciais que regem o problema. O conjunto de todos os elementos utilizados para discretizar a peça é chamado de malha.

Para representar de forma fiel o funcionamento do componente sem comprometer o custo computacional, algumas considerações foram feitas dentro do modelo. Inicialmente, a mola foi considerada ideal, que não sofre nenhum tipo de perda de energia e segue a lei de Hooke (NORTON, 2013), de forma que fosse possível utilizar o recurso "mola" do próprio software para a solução numérica. Como as tensões não se propagam de forma significativa para este componente, ele foi separado dos demais para fins de solução.

Nesta análise, foi considerado uma condição de contorno indireta, sendo assim aplicado um deslocamento inicial e não uma força inicial, realizando um deslocamento de trinta graus do conjunto extrator no sentido horário (deslocamento real do dispositivo, verificado em campo), de forma que fosse possível realizar a simulação sem ser necessário estimar uma força resultante, possibilitando um resultado mais confiável.

3.8.2 Análise Estrutural da Haste de Acionamento

Esse é o componente mais crítico do dispositivo, que apresenta uma considerável quantidade de quebras em curtos espaços de tempo. Para este componente, existiam dois principais fatores que poderiam estar causando o número de quebras excessivas, sendo um a falha por fadiga, onde um componente sujeito a um esforço repetitivo pode falhar mesmo com tensões abaixo dos limites de escoamento e o outro o movimento de soltura do produto, onde uma barra de metal entra em contato com a haste, o que resulta em uma carga de impacto muito alta devido ao pouco tempo de contato entre a barra e a haste do dispositivo.

Para esta análise, a força atuante na haste foi considerada como uma carga de impacto, devido às condições de funcionamento do dispositivo. Por se tratar de um impacto entre dois materiais com dureza e tenacidade consideráveis, o tempo de contato seria muito pequeno, tem-se a amplificação dos esforços atuantes.

Para ser realizada uma equivalência, de forma a ser possível realizar uma análise estática estrutural da haste de acionamento do dispositivo, é necessário calcular a força de impacto com base na velocidade e no tempo de contato entre choques no regime elástico de metal com metal, ou seja, transformar o esforço instantâneo realizado pelo choque da haste de acionamento com a barra do equipamento em uma carga estática, para isso sendo utilizada a teoria de impacto de Hertz (SHIGLEY, 1989), a partir de medições experimentais realizadas no equipamento, em campo, operando na velocidade máxima de produção.

Desta forma, o tempo do choque ou contato estimado pode ser calculado através da Equação 3 (SHIGLEY, 1989), sendo expresso em milissegundos (ms). Foi suposto que os materiais da barra e da haste são os mesmos, tendo em vista que os valores das principais incógnitas (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson) praticamente não variam, caso alterássemos o material da barra para outro aço inoxidável.

$$T_c = 6,46 \rho^{\frac{2}{5}} \left[\frac{R}{U_o^{\frac{1}{5}} E^{\frac{2}{5}}} \right] \quad (3)$$

Na Equação 3, ρ é a densidade ou coeficiente de Poisson do material, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3), R é o raio da haste, expresso em milímetros, U_o é a velocidade de contato, expressa em metros por segundo e E é o módulo de elasticidade do material, expresso em quilo-newtons por milímetro quadrado (KN/mm^2).

O impacto pode ser considerado como a variação na quantidade de movimento, conforme a Equação 4, também podendo ser expresso como a multiplicação da força de impacto pelo tempo de impacto (NORTON, 2013), conforme a Equação 5.

$$I = \Delta Q \text{ ou } I = mv_1 - mv_2 \quad (4)$$

$$I = F_i \Delta T_c \quad (5)$$

Na Equação 4, m é a massa do componente, expressa em quilogramas (Kg) e v é a velocidade de impacto, expressa em metros por segundo. Já na Equação 5, F_i é a força de impacto, expressa em Newtons (N) e T_c é o tempo do choque ou impacto, expresso em milissegundos.

Utilizando as Equações anteriores conseguimos encontrar o valor de carga estática para o esforço devido ao choque. Com este valor é possível realizar uma análise estática, que fornecerá o comportamento da estrutura com bastante precisão, sem o custo computacional que existiria caso fosse optado por realizar uma análise dinâmica.

Para o dispositivo original, a velocidade de contato (U_o) foi obtida experimentalmente, partir da realização de três testes cronometrados, com a máquina operando na velocidade máxima de produção, com o valor de 0,1 metros por segundo.

Utilizando a Equação 3, assim como adotando os valores listados a seguir para as respectivas incógnitas, encontramos um valor de tempo de contato (T_c) de aproximadamente 0,04 milissegundos.

- $R = 3,5 \text{ mm}$
- $U_0 = 0,1 \text{ m/s}$
- $E = 193 \text{ KN/mm}^2$
- $\rho = 8.0 \text{ g/cm}^3$

Utilizando as Equações 4 e 5, encontramos uma força de contato atuante de aproximadamente 50 Newtons ou 5 quilograma-força (Kgf).

Para o dispositivo desenvolvido, a velocidade de contato foi obtida com base no mesmo método citado quando da análise estrutural da haste de acionamento do dispositivo original. Utilizando a Equação 3, assim como adotando os valores listados a seguir para as respectivas incógnitas, onde temos somente alterações dos valores do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson do material, encontramos um valor de tempo de contato de aproximadamente 0,038 milissegundos.

- $R = 3,5 \text{ mm}$
- $U_0 = 0,1 \text{ m/s}$
- $E = 210 \text{ KN/mm}^2$
- $\rho = 7.7 \text{ g/cm}^3$

Utilizando as Equações 4 e 5, encontramos uma força de contato atuante de aproximadamente 52 Newtons (5,2 quilograma-força). Com este valor é possível realizar uma análise estática, que nos fornecerá o comportamento da estrutura com bastante precisão sem o custo computacional que existiria caso fosse optado por realizar uma análise dinâmica.

3.8.3 Análise Estrutural da Mola Principal

Para a análise do componente mola principal da estrutura foi utilizada a sua simetria, conforme mostrado na Figura 40. A parte acima do plano é exatamente igual à parte abaixo dele. Além disso, a estrutura da mola é composta apenas pela parte representada em verde, sendo o gancho na cor magenta uma parte da mola em si, mas sim uma extensão do componente com finalidade apenas de fixação.

Portanto, um modelo que inicialmente constituiria a mola por completo, pode ser simplificado para um modelo contendo apenas a parte em verde, sem nenhuma de informação.

Para esta análise foi utilizada a modelagem em torno das propriedades mecânicas de um material comercialmente utilizado em molas estruturais (aço inoxidável 17-7 PH, ASTM 313-A 631), obtidos a partir de normas ASTM (2019), onde verificamos uma tensão admissível em torno de 2.000 megapascals. Os dados da curva de fadiga do material foram obtidos com base em reportes técnicos de testes com este material em aplicações similares (HARMSWORTH, 2019).

3.8.4 Análise Estrutural da Pastilha

O caso da pastilha em metal duro envolve critérios e considerações mais peculiares. O esforço no qual a mesma está sujeita, apesar de mecanicamente simples, é extremamente complexo de ser modelado para uma análise computacional, uma vez que a área de contato entre o palito de madeira e a pastilha de metal duro sendo variável, as tensões aplicadas consequentemente também (uma vez que dependem da área de contato), assim como a velocidade do movimento. Estes três fatores são decisivos para uma análise computacional.

O método dos elementos finitos é um método numérico para a solução aproximada de uma equação diferencial (LEE, 2014). Contudo, a equação diferencial que representa o problema é extremamente complexa, e possivelmente uma solução numérica não obtenha uma precisão razoável.

Para fins de engenharia, foi realizada uma análise utilizando conceitos de tribologia (área destinada ao estudo de atrito entre materiais), afim de se obter uma estimativa acerca do número de ciclos para os materiais. Como o palito passa pelo processo apenas uma única vez, estamos interessados apenas no desgaste da pastilha.

Desse modo, foi necessária a análise do desgaste superficial (por abrasão) desse componente. Em geral, o desgaste é inversamente proporcional à dureza (SHIGLEY, 1989). A taxa de desgaste pode ser determinada através de um ensaio, contudo, o volume de desgaste é independente da velocidade de deslizamento e pode ser calculada pela Equação 6 (NORTON, 2013), sendo expressa em metros por segundo.

$$V = K_d \left[\frac{F_n L}{H} \right] \quad (6)$$

Na Equação 6, K_d é o coeficiente de desgaste do material (adimensional), F_n é a força normal aplicada, expressa em Newtons, L é o comprimento do deslizamento entre a pastilha e o palito, expresso em milímetros, H é a dureza absoluta do material do palito (madeira), expressa em Newtons, na escala “*Janka Hardness*”.

Contudo, a variável de relevância para a análise é a profundidade do desgaste. A mesma pode ser calculada a partir da Equação 6, dividindo o valor do volume de desgaste “ V ” pela área de contato média, conforme Equação 7, sendo expressa em milímetros, onde A_c é a área de contato aparente entre a pastilha e o palito, expressa em milímetros quadrados (mm^2). Diferentemente da análise computacional, existem apenas variações lineares, podendo dessa forma considerar a área média.

$$d = K_d \left[\frac{F_n L}{H A_c} \right] \quad (7)$$

3.8.5 Análise Estrutural da Base

Os esforços e deslocamentos que ocorrem no funcionamento do dispositivo são transferidos do conjunto extrator e da haste de acionamento para a base através dos eixos que se conectam aos furos “A”, “B”, “C” e “D”.

Para determinar a intensidade dos esforços, tais furos foram considerados como apoios, sendo realizado o cálculo das suas reações de equilíbrio a partir das equações de equilíbrio de forças e momentos nas três direções coordenadas (x , y , z).

Para realizar os cálculos, foi considerada a situação de maior esforço do dispositivo, que corresponde à posição em que a mola principal está em seu momento de maior tracionamento. Além disso, foi adotada a estratégia de dividir o dispositivo em duas partes, como descrito a seguir:

- **Parte I:** Forças atuantes no conjunto extrator e sua influência nos apoios A e B;

- **Parte II:** Forças atuantes na haste de acionamento e sua influência nos apoios C e D.

Na Parte I, as forças atuantes são:

- **F_m:** Força exercida pela mola principal (esta força possui componentes nas três direções coordenadas e seu sentido positivo);
- **F_l:** Força exercida pela haste de transmissão entre o conjunto extrator e a haste de acionamento (esta força foi aproximada para uma componente na direção z e seu sentido positivo).

Antes do cálculo das reações de equilíbrio, é necessário calcular a força exercida pela mola principal, o que é possível a partir do conhecimento do valor da constante elástica “K” da mesma e da variação do seu comprimento, desde a posição “*não tracionada*” até à condição de tração máxima. A força de tração da mola pode ser calculada pela Equação 8 (NORTON, 2013), sendo expressa em Newtons.

$$F_m = K [\Delta s] \quad (8)$$

Na Equação 8, K é constante elástica da mola, expressa em Newtons por milímetro (N/mm), Δs é da variação do seu comprimento, desde a posição “*não tracionada*” até à condição de tração máxima, expressa em milímetros. A constante elástica da mola pode ser calculada pela Equação 9 (NORTON, 2013), sendo expressa em Newtons por milímetro.

$$K = \frac{d_m^4 G}{8 D_e^3 N_a} \quad (9)$$

Na Equação 9, d_m é diâmetro do fio utilizado na mola, expresso em milímetros, G é o módulo de cisalhamento (ou rigidez) do material, expresso em gigapascals (GPa), D_e é o diâmetro médio da espira, expresso em milímetros e N_a é o número de espiras ativas (adimensional). Utilizando a Equação 9, assim como adotando os valores listados a seguir para as respectivas incógnitas, encontramos um valor de constante elástica da mola de 0,281234 Newtons por milímetro.

- $D_m = 0,75 \text{ mm}$

- $G = 70,3 \text{ GPa}$ (Dados obtidos a partir da análise estrutural da mola principal)
- $D_e = 6,5 \text{ mm}$
- $N_a = 36$

O valor de Δs , por sua vez, já calculado no projeto da mola principal, apresenta o valor de aproximadamente 34 milímetros. Dessa forma, obtemos uma força F_m de 9,562 Newtons. Essa força atua de tal forma, no repuxo destinado à fixação da mola principal da base, que sua direção contém componentes nos três eixos coordenados e pode ser decomposta da seguinte forma: $F_m(x, y, z) = (-1,7 ; 3,463 ; 9,226) \text{ Newtons}$.

Quando considerada sua atuação no conjunto extrator, os sentidos das componentes são invertidos, e conseqüentemente têm seus sinais invertidos. No entanto, visando o cálculo das equações de equilíbrio, o valor de todas as componentes foram consideradas como positivas e seus respectivos sinais foram adicionados somente nas equações. Devemos lembrar que, como estamos calculando as reações dos apoios, devemos inverter os sinais das componentes para encontrar as ações aplicadas na base, pois são estas que vão ser inseridas na simulação. Dessa forma, podemos listar as reações nos apoios com suas respectivas equações simplificadas para a “Parte I”, conforme mostrado na Tabela 6:

Tabela 6 - Reações nos apoios A e B com suas respectivas equações simplificadas		
Variável	Descrição	Valor (N)
F_{m_x}	Módulo da componente x da mola	1,7
F_{m_y}	Módulo da componente y da mola	3,463
F_{m_z}	Módulo da componente z da mola	9,226
F_I	Força da haste de acionamento	4,558133577310156
B_x	Componente x da reação no apoio B	- 1,7 N
B_y	Componente y da reação no apoio B	0,661563679245283
B_z	Componente z da reação no apoio B	0,59072981149338
A_y	Componente y da reação no apoio A	2,801436320754717
A_z	Componente z da reação no apoio A	13,193403765816777

Fonte: O Autor (2019)

Temos, dessa forma, os seguintes esforços atuantes nos furos A e B da base:

- $A(x, y, z) = (0 ; - 2,8 ; - 13,1934) \text{ N}$
- $B(x, y, z) = (1,7 ; - 0,662 ; - 0,591) \text{ N}$

Na Parte II, as forças atuantes são:

- F_I = Força da haste de transmissão (já descrita anteriormente e responsável por acoplar a Parte I com a Parte II);
- F_{ac} = Força de acionamento da haste (aproximada para uma componente na direção z e corresponde à força exercida por uma barra da máquina na haste de acionamento). Sua aplicação foi realizada exatamente no ponto intermediário entre a força da haste de transmissão e a ponta inferior da haste de acionamento).

Dessa forma, podemos listar as reações nos apoios com suas respectivas equações simplificadas para a “Parte II”, conforme mostrado na Tabela 7:

Tabela 7 - Reações nos apoios A e B com suas respectivas equações simplificadas

Variável	Descrição	Valor (N)
F_{ac}	Força de acionamento	2,7348801463860934
D_z	Componente z da reação no apoio D	0,4687137357800067
C_z	Componente z da reação no apoio C	- 2,2919671667040693

Fonte: O Autor (2019)

Temos, dessa forma, os seguintes esforços atuantes nos furos C e D da base:

- $C(x, y, z) = (0 ; 0 ; 2,292) \text{ N}$
- $D(x, y, z) = (0 ; 0 ; - 0,469) \text{ N}$

A profundidade do desgaste por abrasão na base pode ser calculada pela Equação 7 (Equação de *Archard*), sendo expressa em milímetros (FARIAS, 2020). Além dos parâmetros geométricos do deslizamento e da força normal no contato entre a base e o palito, é necessário conhecer o coeficiente de desgaste, obtido experimentalmente.

Por se tratar de um trabalho inédito, não existem evidências de resultados experimentais para um sistema tribológico constituído pela base e palito, sendo necessária uma pesquisa que

subsidiasse o estudo, de forma a ser encontrado um valor aproximado para o coeficiente de desgaste para os materiais empregados na base, em interação com outros abrasivos, que apesar de terem uma dureza, e conseqüente severidade do desgaste bem maior, servem para fins de comparação entre estes materiais empregados e o palito, bem como ter ideia da durabilidade de ambos.

Uma medida que indica a severidade do desgaste é a relação “ H_a/H ”, onde H_a é a dureza do abrasivo, expressa em megapascals. Quando $0,8 < H_a/H < 1,2$ o desgaste é considerado moderado (SHIGLEY, 1989). Existe uma variação na equação de *Archard* (Equação 7), onde pode ser utilizado um coeficiente de desgaste dimensional (k) ou adimensional (K_d) que estão relacionados através da dureza (H) por meio da Equação 10:

$$k = \frac{K_d}{H} \quad (10)$$

Para este cálculo geralmente é utilizada a dureza do material menos rígido, tendo em vista que este tende a se desgastar mais rapidamente. Entretanto, como cada palito só participa de um ciclo, será utilizado o valor da dureza do material empregado na base, tendo em vista o interesse no cálculo do valor do desgaste deste componente.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

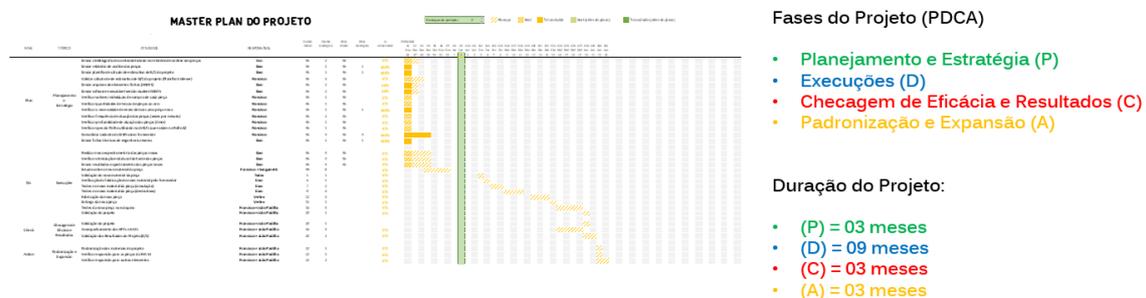
Serão descritos a seguir os tópicos referentes aos materiais e métodos que permeiam a execução do trabalho.

4.1 ESTRATÉGIA E GOVERNANÇA DO PROJETO

De forma a organizar a estratégia e governança do projeto, foi montada uma equipe multidisciplinar interna da Empresa, liderada pelo Autor e composta por funcionários das áreas de manufatura e operação, manutenção, qualidade e engenharia, a qual conta com o suporte de Empresas Fornecedoras e Institutos de Tecnologia, visando a execução de testes, análises e ensaios. Nesse contexto, diante dos resultados obtidos a partir métodos utilizados, foi desenvolvida uma cadeia de fornecedores, responsáveis pela fabricação dos protótipos e produtos finais acabados. Todas as atividades e etapas foram alinhadas e validadas junto ao Orientador, conforme seu avanço e desenvolvimento. Nesse primeiro momento, foi iniciada a governança do projeto, sendo realizada uma análise inicial de viabilidade financeira do projeto, de forma a validar a sua execução.

Com base na validação da execução do projeto, foi montado o seu “*Master Plan*” ou calendário de execução, baseado no conceito “*PDCA*” (Planejar - Fazer - Checar – Agir), com fases e tempos de duração definidos, conforme mostrado na Figura 21, assim como a sistemática de reuniões e encontros, e um plano de ação.

Figura 21 - Master Plan do Projeto



Fonte: O Autor (2019)

Como uma das atividades da governança do projeto, foi construído um fluxo de ações, o qual baliza toda a sequência lógica de desenvolvimento e testes dos protótipos, até a validação

do produto final acabado, conforme mostrado nas Tabelas 8 e 9. Toda a sequência de ações foi gerenciada e validada pelo Autor.

Tabela 8 - Fluxo de Ações do Desenvolvimento do Protótipo

Sequência Atividade	Grupo de Atividades	Número Atividade	Atividade
1	Identificação de Materiais Dispositivo Original e Caracterização dos Materiais dos Protótipos	1.1	Espectrometria por Emissão Óptica
		1.2	Caracterização Microestrutural
		1.3	Ensaio de Tração
		1.4	Ensaio de Dureza
2	Metodologia do Projeto de Engenharia Reversa	2.1	Confecção de Fichas Técnicas
		2.2	Validação de Fichas Técnicas
3	Metodologia de Projeto de Análise Estrutural dos Componentes	3.1	Elaboração do Plano Sistêmico
		3.2	Análise do Conjunto Extrator
		3.3	Análise da Haste de Acionamento
		3.4	Análise da Mola Principal
		3.5	Análise da Pastilha
		3.6	Análise da Base
4	Fabricação dos Protótipos	4.1	Desenvolvimento das Programações CNC e CAM
		4.2	Desenvolvimento de “ <i>Gabaritos</i> ” e Ferramentas de Suporte à Fabricação
		4.3	Desenvolvimento e Aplicação de Tratamento Superficial
		4.4	Execução dos Processos de Fabricação
5	Testes em Campo dos Protótipos	5.1	Confecção de Proposta de Gerenciamento de Mudanças no Equipamento (MOC)
		5.2	Análises de Design Higiênico
		5.3	Acompanhamento e Análise de Critérios de Performance e Tempo de Vida Útil
6	Validação dos Protótipos	6.1	Conclusão de Proposta de Gerenciamento de Mudanças no Equipamento (MOC)
		6.2	Autorização para Fabricação em série da Versão Final do Dispositivo

Fonte: O Autor (2019)

Tabela 9 - Fluxo de Ações do Desenvolvimento da Versão Final do Dispositivo

Sequência Atividade	Grupo de Atividades	Número Atividade	Atividade
1	Caracterização dos Materiais dos Dispositivos na Versão Final	1.1	Espectrometria por Emissão Óptica
		1.2	Caracterização Microestrutural
		1.3	Ensaio de Tração
		1.4	Ensaio de Dureza
2	Metodologia do Projeto de Engenharia Reversa	2.1	Confecção de Fichas Técnicas
		2.2	Validação de Fichas Técnicas
3	Metodologia de Projeto de Análise Estrutural dos Componentes	3.1	Análise do Conjunto Extrator
		3.2	Análise da Haste de Acionamento
		3.3	Análise da Mola Principal
		3.4	Análise da Pastilha
		3.5	Análise da Base
4	Fabricação da Versão Final dos Dispositivos	4.1	Desenvolvimento das Matrizes de Conformação de Suporte à Fabricação
		4.2	Desenvolvimento do Processo de Corte a Laser
		4.3	Desenvolvimento e Aplicação de Tratamento Térmico
		4.4	Revalidação do Tratamento Superficial aplicado aos Protótipos
		4.4	Execução dos Processos de Fabricação
5	Testes em Campo	5.1	Análises de Design Higiênico
		5.2	Acompanhamento e Análise de Critérios de Performance e Tempo de Vida Útil
6	Validação do Projeto	6.1	Cálculo de Custo x Benefício e “Pay Back” do Projeto
		6.2	Conclusão do Projeto

Fonte: O Autor (2019)

4.2 ESPECIFICAÇÕES DOS MATERIAIS DO DISPOSITIVO DE EXTRAÇÃO ORIGINAL E PROTÓTIPO

Para a execução das análises de identificação e caracterização de materiais, assim como para as análises de dureza, foram utilizados em uma primeira etapa corpos de prova extraídos de elementos metálicos e cerâmicos de dispositivos já existentes no equipamento e dispositivos originais nunca utilizados em operação, ambos fabricados em Unidade da Empresa Fornecedora, localizada na cidade de Ponta Grossa/PR, assim como dispositivos originais completos, também nunca utilizados em operação. Em uma segunda etapa foram utilizados corpos de prova extraídos de elementos metálicos e cerâmicos desenvolvidos para compor os novos dispositivos, em suas versões finais. Em paralelo, também foram utilizados diversos produtos químicos associados aos processos de niquelamento e “*sanitização*” e limpeza dos dispositivos em campo.

Visando as fabricações dos protótipos e versão final do dispositivo desenvolvido, assim como os “*gabaritos*” ou ferramentas de fabricação e matrizes de conformação que suportam todos os processos, foram utilizados materiais comumente recomendados para essas finalidades, construídos e especificados, enquanto que os materiais necessários à execução do processo de tratamento superficial foram selecionados conforme ficha técnica desenvolvida. As especificações dos materiais utilizados na fabricação dos protótipos estão listadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Especificações dos materiais utilizados na fabricação dos protótipos

Especificação do Material
Chapa 1,00 X 1300 X 2000 ASTM A240 2B AISI 304L
Chapa 2,00 X 1300 X 2000 ASTM A240 2B AISI 304L
Barra em Aço AISI 304L Cilíndrica Diâmetro 5 mm
Barra em Aço AISI 304L Cilíndrica Diâmetro 6 mm
Barra em Aço AISI 304L Cilíndrica Diâmetro 6,35 mm
Barra em Aço AISI 304L Cilíndrica Diâmetro 9,53 mm
Barra em Aço AISI 304L Cilíndrica Diâmetro 11,11 mm
Barra em Aço AISI 304L Cilíndrica Diâmetro 12,70 mm
Barra em Aço AISI 304L Cilíndrica Diâmetro 22,22 mm
Barra em Aço AISI 304 Quadrada Espessura 15,87 mm

Fonte: O Autor (2019)

Após o corte das amostras, preparação inicial e identificação dos corpos de provas, estes foram separados de acordo com cada Ensaio realizado, juntamente a seus respectivos Equipamentos, Sistemas e Instrumentos específicos.

4.3 ANÁLISES PARA IDENTIFICAÇÃO DE MATERIAIS DO DISPOSITIVO DE EXTRAÇÃO ORIGINAL

A etapa de análises para identificação dos materiais do dispositivo de extração original foi dividida e composta por atividades que compreendem a análise inicial por espectrometria por emissão óptica, caracterização microestrutural e ensaios de dureza, de forma a chegar-se à conclusão de quais tipos de aço estão sendo utilizados em suas estruturas, e assim poder ter um ponto de partida para desenvolver um novo dispositivo, com melhores propriedades mecânicas e melhor performance em campo. Estas análises serão abordadas com mais profundidade no decorrer do trabalho.

4.3.1 Análises de Espectrometria por Emissão Óptica

Visando caracterizar a composição química dos materiais do dispositivo, foram selecionadas e extraídos elementos metálicos e cerâmicos do mesmo. De forma a validar os resultados obtidos, observou-se a necessidade de execução de novos ensaios de contraprova nos mesmos elementos, conforme será listado no decorrer do trabalho.

4.3.1.1 Normas de Referência e Documentos Complementares

- ASTM E572-13 – Standard Test Method for Analysis of Stainless and Alloy Steels by Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry
- ASTM E 415:2017 – Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry
- ASTM E 1086:2014 – Standard Test Method for Analysis of Austenitic Stainless Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry
- ASTM A 751:2014a – Standard Test Methods, Practices, and Terminology for Chemical Analysis of Steel Products

4.3.1.2 Aparelhagem Empregada na Primeira Análise

A aparelhagem necessária à execução da primeira análise de espectrometria por emissão óptica dos materiais do dispositivo original está listada na Tabela 11, juntamente com suas especificações técnicas:

Tabela 11 - Aparelhagem necessária à execução da primeira análise de espectrometria por emissão óptica dos materiais do dispositivo original

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Cortadora Metalográfica	Arotec	COR250	-
Espectrômetro de Emissão Óptica	Rigaku	ZSX Primus II	-

Fonte: O Autor (2019)

4.3.1.3 Preparação dos Corpos de Prova da Primeira Análise

Os corpos de prova para execução da primeira análise foram obtidos a partir de segmentos de dispositivos já existentes no equipamento. De cada dispositivo foi extraído apenas um corpo de prova de cada tipo de material, sendo uma amostra de material metálico da base do dispositivo e uma amostra de material cerâmico da pastilha anexada ao sistema de extração do dispositivo, sendo identificados conforme a Tabela 12, com suas respectivas dimensões.

Tabela 12 - Identificação dos corpos de prova utilizados nas análises para identificação de materiais do dispositivo de extração original

Nº Corpo de Prova	Tipo do Material	Origem da Amostra	Dimensões		
			Largura (mm)	Comprimento (mm)	Altura (mm)
AM-01	Metálico	Base do Dispositivo	30	30	2
AM-02	Cerâmico	Pastilha anexada ao Sistema de Extração do Dispositivo	30	30	2

Fonte: O Autor (2019)

4.3.1.4 Procedimento da Primeira Análise

Após o corte, os corpos de prova foram lixados com lixa de granulação (grãos de areia por centímetro quadrado) de 60 μm e depois posicionados no espectrômetro de emissão óptica

mostrado na Figura 48. Os resultados são visualizados e captados em tela de computador anexo ao equipamento, por meio de software atrelado ao mesmo.

4.3.1.5 Aparelhagem Empregada na Análise de Contra Prova

A aparelhagem necessária à execução da análise de contra prova de espectrometria por emissão óptica dos materiais do dispositivo original está listada na Tabela 13, juntamente com suas especificações técnicas:

Tabela 13 - Aparelhagem necessária à execução da análise de contra prova de espectrometria por emissão óptica dos materiais do dispositivo original

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Cortadora Metalográfica	Arotec	COR250	-
Espectrômetro de Emissão Óptica	Spectro	SPECTROMAXx	131/382/11

Fonte: O Autor (2019)

4.3.1.6 Preparação dos Corpos de Prova da Análise de Contra Prova

Os corpos de prova para execução da análise de contra prova foram obtidos a partir de segmentos de dispositivos originais nunca utilizados em operação. De cada dispositivo foi extraído apenas um corpo de prova de material metálico da base do dispositivo, conforme já mostrado na Figura 49 (a), sendo identificados conforme a Tabela 12, com suas respectivas dimensões. Não foi necessária a preparação de corpos de prova a partir dos materiais cerâmicos da pastilha anexada ao sistema de extração do dispositivo, para fins de análises de contra prova, por se entender que as primeiras análises para este tipo de material apresentaram resultados confiáveis.

4.3.1.7 Procedimento da Análise de Contra Prova

Após o corte, os corpos de prova foram lixados com lixa de granulação de 60 μm e depois posicionados no espectrômetro de emissão óptica mostrado na Figura 50, regulado pelo certificado de calibração número 12112018, emitido por Empresa Fornecedora, em 12/11/2018. Os resultados são visualizados e captados em tela de computador anexo ao equipamento, por meio do software FELAST[®] versão FE-10-M. Não foi necessária a realização de análises de

contra prova nos materiais cerâmicos da pastilha anexada ao sistema de extração do dispositivo, por se entender que as primeiras análises para este tipo de material apresentaram resultados confiáveis.

4.3.2 Caracterização Microestrutural

Visando realizar a verificação de micrografias e fases constantes na liga metálica, e dessa forma analisar os materiais sob o ponto de vista estrutural, relacionando-a às suas respectivas propriedades físicas e processo de fabricação, e assim prever o comportamento da mesma em uma determinada aplicação, evitando sua indevida utilização, foram selecionadas e extraídos elementos metálicos do dispositivo.

4.3.2.1 Normas de Referência e Documentos Complementares

- ABNT NBR 13284 – Preparação de corpos-de-prova para análise metalográfica – Procedimento
- ASTM E883 – Standard Guide for Reflected - Light Photomicrography
- ASTM 407-07 (89) – Standard Practice for Microetching Metals and Alloys

4.3.2.2 Aparelhagem

A aparelhagem necessária à execução das análises de caracterização microestrutural dos materiais do dispositivo original está listada na Tabela 14, juntamente com suas especificações técnicas:

Tabela 14 - Aparelhagem necessária à execução das análises de caracterização microestrutural dos materiais do dispositivo original

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Cortadora Metalográfica	Arotec	COR250	-
Prensa de Embutimento	Arotec	PRE-30Mi	-
Lixadeira Politriz	Arotec	Aropol 2V-PU	-
Água Régia	Anidrol	PAP.AS-5810	-
Microscópio Metalográfico	Olympus	BX51M	-

Fonte: O Autor (2019)

4.3.2.3 Preparação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova para execução das análises de caracterização microestrutural foram obtidos a partir de segmentos de dispositivos já existentes no equipamento. De cada dispositivo foi extraído apenas um corpo de prova de uma amostra de material metálico da base do dispositivo, conforme mostrado na Figura 49 (a), sendo identificados conforme a Tabela 12, com suas respectivas dimensões.

4.3.2.4 Procedimento

Os corpos de prova foram seccionados nas dimensões especificadas na Tabela 12 por meio da cortadora metalográfica. Em seguida, foram embutidos em molde de 30 gramas de resina tipo baquelite na prensa de embutimento, a uma pressão entre 125 e 150 quilogramas-força por milímetro quadrado (Kgf/mm^2), garantindo o tempo de aquecimento em torno de dez minutos e o tempo de resfriamento em torno de cinco minutos, de forma a facilitar o posterior lixamento e polimento na lixadeira politriz.

Posteriormente, os corpos de prova foram submetidos a lixamentos sequencialmente adequados com granulações 220, 380, 600 e 1200, mudando-se a posição da operação de direção em noventa graus em cada lixa subsequente até desaparecerem os traços da lixa anterior, até chegar-se à lixa de granulação 1200. Foram eliminados, por novo lixamento, riscos profundos que surgirem durante o lixamento, de forma que só restaram os riscos da última lixa utilizada.

O polimento foi realizado sob o mesmo sequenciamento de posições mostrado na Figura 37, com pano em feltro e pasta de diamante com granulação $1\ \mu\text{m}$, de forma a movimentar a amostra o no sentido inverso ao do movimento do pano.

Por último, foi realizado o ataque químico por doze segundos, com solução água régia, sendo realizada em seguida a verificação micrográfica na superfície polida e atacada quimicamente, por meio do microscópio metalográfico mostrado na Figura 51 (e).

4.3.3. Análises de Dureza

Visando realizar a verificação da resistência à deformação plástica permanente e à penetração dos materiais, de forma a conhecer as suas resistências mecânicas e ao desgaste, assim como o efeito dos tratamentos térmicos empregados, foram selecionadas e extraídos elementos metálicos do dispositivo.

4.3.3.1 Normas de Referência e Documentos Complementares

- ASTM E384 - Standard Test Method for Microindentation Hardness of Material
- ASTM E92 - Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials
- ASTM E18 - Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials

4.3.3.2 Aparelhagem

A aparelhagem necessária à execução das análises de dureza dos materiais do dispositivo original está listada na Tabela 15, juntamente com suas especificações técnicas. As caracterizações foram feitas em dois durômetros diferentes, por questões de segurança do resultado.

Tabela 15 - Aparelhagem necessária à execução de análises de dureza dos materiais do dispositivo original

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Durômetro Vickers (HV)	WPM	HP 250	-
Microdurômetro Rockwell C (HRC)	Insize	ISH	TVD1000

Fonte: O Autor (2019)

4.3.3.3 Preparação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova para execução das análises foram obtidos a partir de segmentos de dispositivos já existentes no equipamento. De cada dispositivo foi extraído apenas um corpo de prova de cada tipo de material, sendo uma amostra de material metálico da base do dispositivo e uma amostra de material cerâmico da pastilha anexada ao sistema de extração do dispositivo,

conforme mostrado na Figura 40, sendo identificados conforme a Tabela 12, com suas respectivas dimensões.

4.3.3.4 Procedimento para Análise de Dureza Vickers

Os corpos de prova extraídos de material metálico, seccionados nas dimensões especificadas na Tabela 12, foram colocados na mesa base do durômetro mostrado na Figura 52 (a), onde foram penetrados pela respectiva pirâmide de diamante de base quadrada, sob uma carga de 0,5 quilogramas, por quinze segundos, quando do acionamento do equipamento, gerando três resultados.

4.3.3.5 Procedimento para Análise de Dureza Rockwell C

Os corpos de prova extraídos de material cerâmico foram seccionados nas dimensões especificadas na Tabela 12. A carga foi aplicada em etapas, ou seja, primeiro foi aplicada uma pré-carga por meio de um bloco padrão de 29,7 HRC, para calibração, depois sendo aplicada a carga de 0,5 quilogramas propriamente dita. Foram realizadas cinco medidas, descartando-se o valor mais baixo e o mais alto, de forma a se poder avaliar os valores mais próximos do centro da média real.

A leitura do grau de dureza foi realizada por meio de mostrador acoplado ao equipamento, de acordo com escala predeterminada, adequada à faixa de dureza do material. Os penetradores utilizados no equipamento mostrado na Figura 52 (b) foram do tipo cônico (cônico de diamante com 120 graus de conicidade).

4.4 ANÁLISES DE ESPECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS DO PROTÓTIPO DO DISPOSITIVO DE EXTRAÇÃO DESENVOLVIDO

O objetivo destas análises é validar, com alto nível de exatidão e detalhe, as especificações técnicas dos materiais que irão compor os componentes do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido, pelo uso de ensaios destrutivos e não destrutivos, os quais provêm meios para a comprovação de seus elementos químicos e suas respectivas composições percentuais, verificação de micrografias e fases constantes, assim como a observância de comportamentos no que se diz respeito às suas resistências à perfuração e tração mecânica.

4.4.1 Análises de Espectrometria por Emissão Óptica

4.4.1.1 Normas de Referência e Documentos Complementares

- ASTM E 415:2017 – Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry
- ASTM E 1086:2014 – Standard Test Method for Analysis of Austenitic Stainless Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry
- ASTM A 751:2014a – Standard Test Methods, Practices, and Terminology for Chemical Analysis of Steel Products

4.4.1.2 Aparelhagem

A aparelhagem necessária à execução da análise de espectrometria por emissão óptica dos materiais do protótipo está listada na Tabela 16, juntamente com suas especificações técnicas:

Tabela 16 - Aparelhagem necessária à execução da análise de espectrometria por emissão óptica dos materiais do protótipo

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Cortadora Metalográfica	Arotec	COR250	-
Espectrômetro de Emissão Óptica	Spectro	SPECTROMAXx	159239

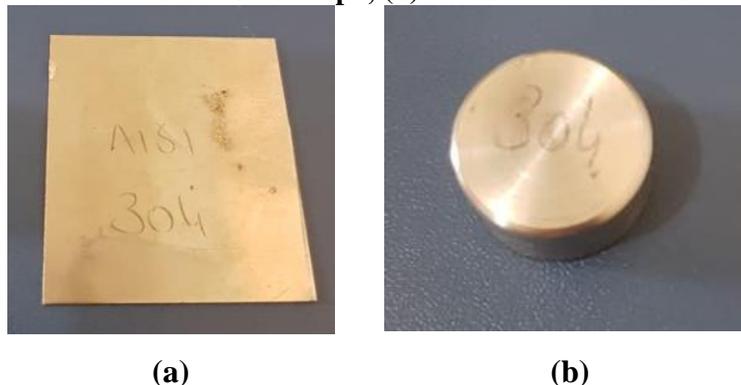
Fonte: O Autor (2019)

4.4.1.3 Preparação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova para execução das análises foram obtidos a partir de materiais selecionados e destinados à fabricação dos componentes dos protótipos, sendo cada material inspecionado dimensionalmente e visualmente quanto à sua integridade física, em formatos de chapa e cilíndrico, conforme mostrado na Figura 22, sendo identificados conforme a Tabela 17, com suas respectivas dimensões.

Figura 22 - Separação dos corpos de prova utilizados nas análises de espectrometria por emissão óptica dos materiais do protótipo:

(a) Amostra em formato de chapa; (b) Amostra em formato cilíndrico



Fonte: O Autor (2019)

Tabela 17 - Identificação dos corpos de prova utilizados nas análises de espectrometria por emissão óptica dos materiais do protótipo

Nº Corpo de Prova	Especificação do Material	Formato da Amostra	Dimensões			
			Diâmetro (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Altura (mm)
AM-03	Aço AISI 304	Chapa	-	100	100	1
AM-04	Aço AISI 304	Cilindro	40	-	-	100

Fonte: O Autor (2019)

4.4.1.4 Procedimento

Após o corte, os corpos de prova foram lixados com lixa de granulação de 60 μm e depois posicionados no espectrômetro de emissão óptica mostrado na Figura 53 (b). Os resultados são visualizados e captados em tela de computador anexo ao equipamento, por meio do software FELAST[®] versão FE-10-M.

4.4.2 Caracterização Microestrutural

4.4.2.1 Normas de Referência e Documentos Complementares

- ABNT NBR 13284 – Preparação de corpos de prova para análise metalográfica – Procedimento
- ABNT NBR 15454:2007 – Metalografia das ligas de ferro-carbono – Terminologia

4.4.2.2 Aparelhagem

Foi utilizada a mesma aparelhagem empregada nas análises de caracterização microestrutural dos materiais do dispositivo de extração original.

4.4.2.3 Preparação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova para execução das análises foram obtidos a partir de materiais selecionados e destinados à fabricação dos componentes dos protótipos, sendo cada material inspecionado dimensionalmente e visualmente quanto à sua integridade física, em formatos de chapa e cilíndrico, conforme mostrado na Figura 54, sendo identificados conforme a Tabela 18, com suas respectivas dimensões.

Tabela 18 - Identificação dos corpos de prova utilizados nas análises de caracterização microestrutural dos materiais do protótipo

Nº Corpo de Prova	Especificação do Material	Formato da Amostra	Dimensões			
			Diâmetro (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Altura (mm)
AM-05	Aço AISI 304	Chapa	-	15	15	1
AM-06	Aço AISI 304	Cilindro	15	-	-	50

Fonte: O Autor (2019)

4.4.2.4 Procedimento

Foi utilizado o mesmo procedimento empregado nas análises de caracterização microestrutural dos materiais do dispositivo de extração original.

4.4.3 Ensaio de Tração

Visando realizar a verificação da resistência à tração e a ductibilidade de materiais, quando submetido carga constante, até sua fratura e também verificar as tensões de escoamento e limite máximo de resistência à tração dos materiais ensaiados, foram selecionados e extraídos elementos metálicos do dispositivo.

4.4.3.1 Normas de Referência e Documentos Complementares

- ABNT NBR 6892 – Materiais metálicos – Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente

4.4.3.2 Aparelhagem

A aparelhagem necessária à execução do ensaio de tração dos materiais do protótipo está listada na Tabela 19, juntamente com suas especificações técnicas:

Tabela 19 - Aparelhagem necessária à execução do ensaio de tração dos materiais do protótipo

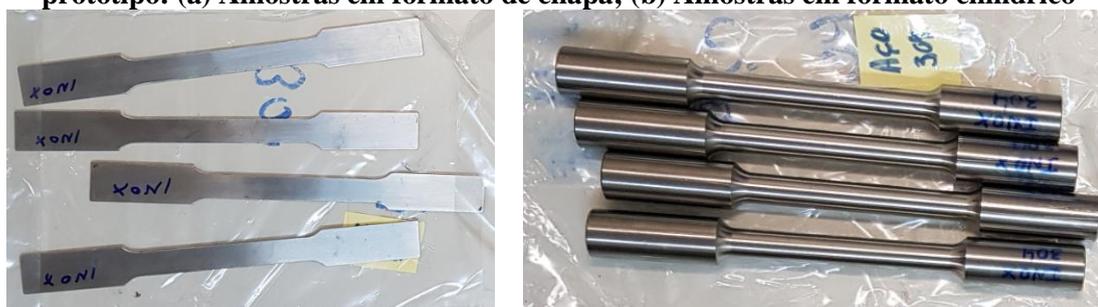
EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Máquina universal de ensaios capacidade 600 KN	Emic	DL-60000	68
Máquina universal de ensaios capacidade 20 KN	Emic	DL-2000	561
Paquímetro Digital capacidade 200mm resolução 0.01 mm	Mitutoyo	CDL-20CP	012121
Termohigrômetro	AKSO	AK-172	-

Fonte: O Autor (2019)

4.4.3.3 Preparação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova para execução dos ensaios foram obtidos a partir de materiais selecionados e destinados à fabricação dos componentes dos protótipos, sendo cada material inspecionado dimensionalmente e visualmente quanto à sua integridade física, em formatos de chapa e cilíndrico, conforme mostrado na Figura 23, sendo identificados conforme a Tabela 20, com suas respectivas dimensões.

Figura 23 - Separação dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração dos materiais do protótipo: (a) Amostras em formato de chapa; (b) Amostras em formato cilíndrico



(a)

(b)

Fonte: O Autor (2019)

Tabela 20 - Identificação dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração dos materiais do protótipo

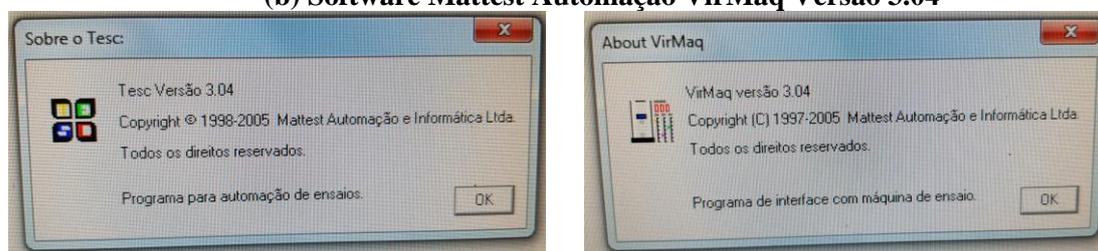
Nº Corpo de Prova	Especificação do Material	Formato da Amostra	Dimensões			
			Diâmetro / Largura Total (mm)	Diâmetro / Largura Útil (mm)	Comprimento Total (mm)	Comprimento Útil (mm)
AM-07	Aço AISI 304	Chapa	20	12,5	200	87,5
AM-08	Aço AISI 304	Chapa	20	12,5	200	87,5
AM-09	Aço AISI 304	Chapa	20	12,5	200	87,5
AM-10	Aço AISI 304	Chapa	20	12,5	200	87,5
AM-11	Aço AISI 304	Cilindro	20	12,5	200	87,5
AM-12	Aço AISI 304	Cilindro	20	12,5	200	87,5
AM-13	Aço AISI 304	Cilindro	20	12,5	200	87,5
AM-14	Aço AISI 304	Cilindro	20	12,5	200	87,5

Fonte: O Autor (2019)

4.4.3.4 Procedimento

Primeiramente, foram inseridos todos os parâmetros do ensaio no softwares Mattest Automação Tesc® Versão 3.04 e VirMaq® Versão 3.04, os quais se comunicam com as respectivas máquinas universais de ensaios, conforme mostrado na Figura 24.

Figura 24. Inserção de parâmetros dos ensaios de tração nos softwares Mattest Automação Tesc® Versão 3.04 e VirMaq® e Versão 3.04: (a) Software Mattest Automação Tesc Versão 3.04; (b) Software Mattest Automação VirMaq Versão 3.04



(a)

(b)

Fonte: O Autor (2019)

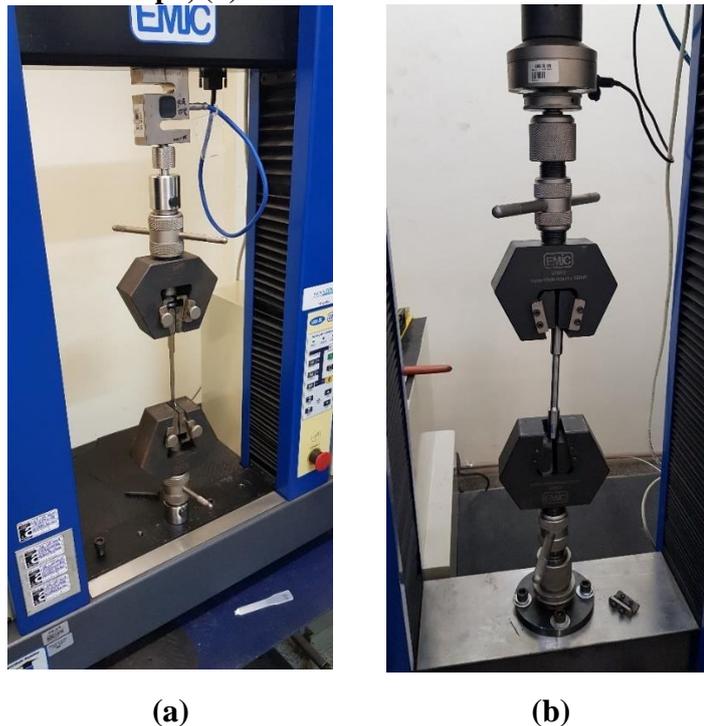
Em seguida, os corpos de prova foram limpos e condicionados durante duas horas a uma temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $(50 \pm 5) \%$, sendo colocados na região

compreendida entre as garras das máquinas universais de ensaios, conforme mostrado na Figura 25, de forma a prendê-los através de uma força de cinco Newtons, ajustando posteriormente o indicador de deslocamento vertical para a referência zero da máquina.

Por fim, os corpos de prova foram tracionados uniaxialmente, com taxa de deformação constante de doze milímetros por minuto, de forma a interromper o ensaio quando ocorrer a ruptura dos mesmos, mais especificamente em suas áreas úteis.

Vale salientar que um corpo de prova de cada tipo de material e formato (no total de quatro, dos dezesseis utilizados) é ensaiado com a finalidade de testar os parâmetros da máquina universal de ensaios em relação ao software, de forma a validar a correta comunicação e analisar a coerência dos resultados. Os valores obtidos como resultados destes ensaios são descartados.

Figura 25. Execução de ensaios de tração dos materiais do protótipo: (a) Amostras em formato de chapa; (b) Amostras em formato cilíndrico



Fonte: O Autor (2019)

4.4.4 Análises de Dureza

4.4.4.1 Normas de Referência e Documentos Complementares

- ABNT NBR ISO 6508-2:2019 - Materiais metálicos - Ensaio de dureza Rockwell

- ABNT NBR NM ISO 6507-1:2019 - Materiais metálicos - Ensaio de dureza Vickers

4.4.4.2 Aparelhagem

A aparelhagem necessária à execução das análises de dureza dos materiais do protótipo está listada na Tabela 21, juntamente com suas especificações técnicas.

Tabela 21 - Aparelhagem necessária à execução de análises de dureza dos materiais do protótipo

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Durômetro Rockwell C (HRC)	Mitutoyo	DT-20	0150808
Kit de Blocos Padrão	Mitutoyo	EP08107273	0150808

Fonte: O Autor (2019)

4.4.4.3 Preparação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova para execução das análises foram obtidos a partir de materiais selecionados e destinados à fabricação dos componentes dos protótipos, sendo cada material inspecionado dimensionalmente e visualmente quanto à sua integridade física, em formatos de chapa e cilíndrico, conforme mostrado na Figura 54, sendo identificados conforme a Tabela 22, com suas respectivas dimensões.

Tabela 22 - Identificação dos corpos de prova utilizados nas análises de dureza dos materiais do protótipo

Nº Corpo de Prova	Especificação do Material	Formato da Amostra	Dimensões			
			Diâmetro (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Altura (mm)
AM-15	Aço AISI 304	Chapa	-	30	30	1
AM-16	Aço AISI 304	Cilindro	15	-	-	30

Fonte: O Autor (2019)

4.4.4.4 Procedimento

Foi utilizado o mesmo procedimento empregado nas análises de dureza Rockwell C dos materiais do dispositivo de extração original.

4.5 METODOLOGIA DO PROJETO DE ENGENHARIA REVERSA DO DISPOSITIVO ORIGINAL

A primeira parte do projeto de modelagem teve como atividade a desmontagem completa de um dispositivo original, para analisar as medidas internas relativas ao mesmo. Após isso, foram confeccionados os desenhos das vistas ortogonais em duas dimensões de todas as partes do dispositivo e um desenho básico das mesmas.

As medidas dos componentes foram conferidas com um paquímetro digital Marca Starret, com faixa nominal de zero a cento e cinquenta milímetros e resolução 0,01 milímetros, regulado pelo certificado de calibração número 156.357, por Laboratório de Calibração e Ensaios Mecânicos de Instituto de Tecnologia, em 25/06/2018.

Com o auxílio do software CAD Autodesk Inventor 2019[®], foi realizada a modelagem de peças separadas e, posteriormente, houve a montagem delas. O material de cada componente e as respectivas medidas estão indicadas em fichas técnicas. Foram confeccionadas um total de dezoito fichas técnicas, com as suas respectivas nomenclaturas listas na Tabela 23.

Tabela 23 - Nomenclaturas das fichas técnicas de dispositivo original, elaboradas a partir da metodologia de Engenharia Reversa

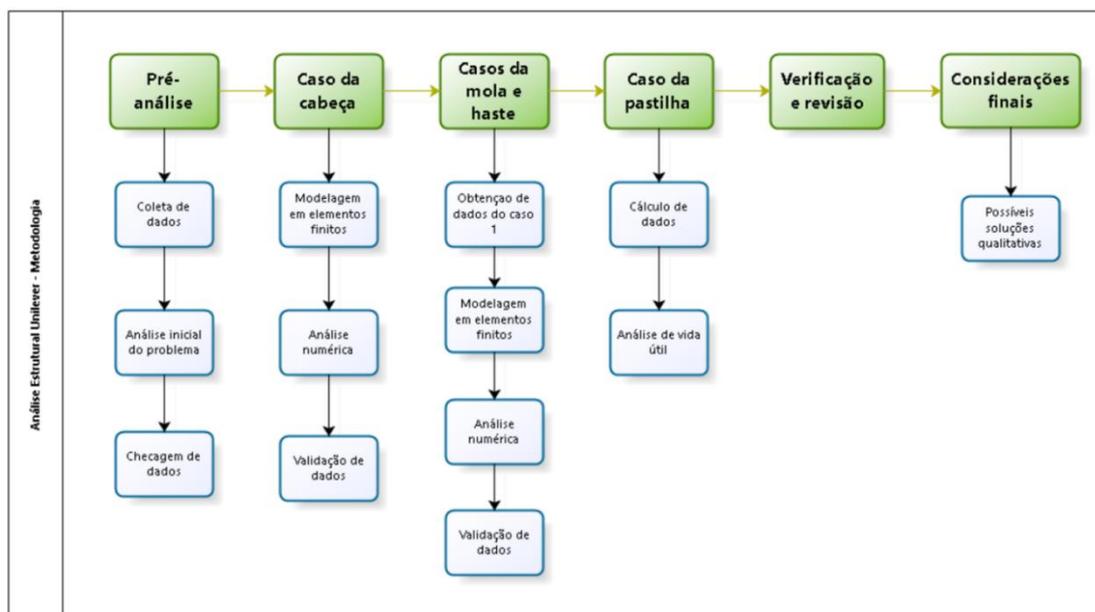
Sequência do Elemento	Nomenclatura	Sequência do Elemento	Nomenclatura
1	Anilha	10	Haste Total
2	Arruela	11	Molas 1 e 2
3	Arruela da Boca	12	Mola 3
4	Boca	13	Montagem Parafuso
5	Boca + Orelha	14	Orelha
6	Eixo Lateral	15	Parafuso
7	Gancho	16	Pastilha da Boca
8	Haste	17	Pinça
9	Haste de Movimento	18	Prendedor

Fonte: O Autor (2019)

4.6 PLANO SISTÊMICO DE EXECUÇÃO DAS ANÁLISES ESTRUTURAIS DO DISPOSITIVO ORIGINAL

Como em todo projeto mecânico, inicialmente, foi realizada uma pré análise dos componentes críticos do sistema como um todo, levantando quais partes eram mais preocupantes e quais escolhas poderiam ser realizadas de forma a manter a fidelidade dos resultados, como por exemplo a simetria da mola para a diminuição do custo computacional. No presente projeto, para cada estrutura considerada crítica foi realizada uma análise única, de forma isolada, para que assim o componente fosse melhor examinado. Foi elaborado um plano sistêmico para suportar as execuções das atividades de análise estrutural, mostrado na Figura 26.

Figura 26 - Plano sistêmico de suporte às execuções das atividades de análise estrutural



Fonte: O Autor (2019)

Inicialmente era necessário separar e entender quais teorias seriam mais adequadas e verificar qual a teoria de falha estática mais adequada, qual a curva mais adequada para a projeção de fadiga da estrutura e quais condições de contorno melhor representam a realidade, antes do início da análise propriamente dita.

Para o critério de falha estático, duas teorias surgiram inicialmente como candidatas, sendo uma o critério de Von-Mises, e a outra o critério de máxima tensão principal. Ambos são largamente aplicáveis em indústrias que utilizam materiais dúcteis, sendo o critério de Von-

Mises mais utilizado em peças otimizadas, por possuir um resultado mais fiel para a maioria das aplicações, por ser um critério menos conservador que os outros, por se basear na energia de deformação, enquanto que outros critérios, como o de Tresca ou critério de máxima tensão principal, por exemplo, se baseia na máxima tensão cisalhante, sendo mais conservador (SHIGLEY, 1989).

Para materiais dúcteis bem comportados (com uma curva tensão-deformação bem comportada, ou seja, curvas contínuas ao longo do domínio e com derivadas contínuas e existentes), a máxima diferença na tensão máxima admissível que pode ser atingida quando comparado o modelo de Von-Mises com o de Tresca chega a 14.4% (sendo o de Von-Mises mais preciso).

Após uma análise mais detalhada, ponderando os prós e contras de cada teoria, foi escolhido o critério de Von-Mises para todas as aplicações, por proporcionar resultados mais próximos da realidade, especialmente para as situações envolvidas.

Os critérios de fadiga para cálculo de vida útil e fator de segurança (FS) seguiram os mesmos critérios de escolha da teoria de falha estática, onde o escolhido foi o critério de Soderberg, pelo fato do mesmo ser considerado como o critério de falha por fadiga mais conservador dentre os mais utilizados (NORTON, 2013), apresentando um resultado com maior margem de segurança, e por com uma maior tolerância ao erro.

Essa escolha se dá tendo em vista que os carregamentos em que o dispositivo está sujeito não podem ser definidos com 100% de certeza, devido às características do equipamento. Apesar dos outros critérios (Goodman ou Gerber) possam ser também aplicados a materiais dúcteis, o critério de Soderberg foi desenvolvido especificamente para materiais dúcteis, sendo esse mais um motivo para sua escolha (SHIGLEY, 1989).

O critério de fadiga e o critério de falha estática não estão necessariamente relacionados matematicamente, mas o critério de fadiga depende dos resultados das tensões estáticas, que são dados pela teoria de falha estática (que no caso, é a teoria de Von-Mises).

Quanto às condições de contorno, cada um dos casos descritos a seguir possui suas respectivas especificidades, e, portanto, não serão melhor detalhadas em suas descrições. Quando

não foi possível calcular com precisão as cargas envolvidas, estas foram estimadas de forma mais conservadora, e assim garantir um resultado com maior confiança para fins de Engenharia, de forma a garantir um resultado igual ou melhor da estrutura. Os tópicos a seguir descrevem as análises estruturais dos elementos mais críticos do dispositivo original.

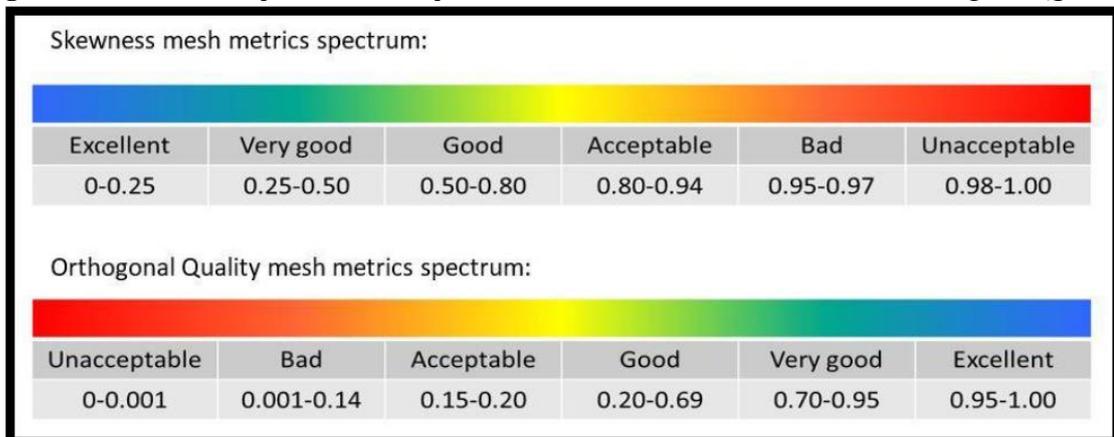
Durante a verificação da qualidade da malha, foram analisados parâmetros adimensionais que servem de critérios e são inerentes à verificação da mesma, seja por Método dos Elementos Finitos ou por outro método.

O primeiro parâmetro é conhecido como “*Skewness*”, uma quantificação da assimetria do elemento, de forma a verificar que ele não está deformado a tal ponto que o resultado numérico sofra um desvio significativo, de modo que, quanto mais próximo de zero for o valor desse parâmetro, melhor será a qualidade da malha.

O Segundo parâmetro é conhecido como “*Orthogonal Quality*”, uma medida da ortogonalidade de um elemento, calculado através do produto escalar dos versores paralelos às arestas do elemento da malha e mede a ortogonalidade de um elemento, de modo que, quanto mais próximo de um for o valor desse parâmetro, melhor será a qualidade da malha.

Estes dois parâmetros seguem as recomendações da ANSYS®, Empresa fabricante do software de análise estrutural utilizado, e o critério de Cornell (MOAVENI, 1999), tendo suas respectivas escalas de qualidade mostradas na Figura 27.

Figura 27 - Escala de qualidade dos parâmetros de malha “*Skewness*” e “*Orthogonal Quality*”



Fonte: O Autor (2019)

4.6.1 Análise Estrutural do Conjunto Extrator do Dispositivo Original

As métricas de malha utilizadas na análise estrutural do conjunto extrator do dispositivo original são mostrados na Tabela 24.

Tabela 24 - Métricas de malha utilizadas na análise estrutural do conjunto extrator do dispositivo original

Indicadores métricos	Skewness	Orthogonal Quality
Mínimo	0,000000068	-
Máximo	-	1
Médio	0,2257	0,766
Desvio padrão	0,217	0,226
Valor Ótimo (média)	0 – 0,3	0,6 – 1

Fonte: O Autor (2019)

Por sua vez, visando a verificação da solução numérica da simulação, foi realizado um refinamento nas regiões (processo de melhoria da qualidade da malha ou discretização) através de algum critério escolhido de maior gradiente de tensão na estrutura, aumentando a quantidade de elementos e nós naquele local em cerca de 70%, tendo em vista que a aplicação recomendada varia de 50% a 100%, de forma a garantir a confiabilidade do método.

As variações de tensões foram da ordem de 1%, indicando assim que a malha apresenta uma qualidade aceitável, e o erro de discretização é baixo (o que é coberto pelo fator de segurança), comprovando com isso que o resultado é independente da malha, garantindo assim a sua consistência, tendo em vista que a aplicação recomendada nunca ultrapasse 10%, de forma a também garantir a confiabilidade do método (MOAVENI, 1999).

4.6.2 Análise Estrutural da Haste de Acionamento do Dispositivo Original

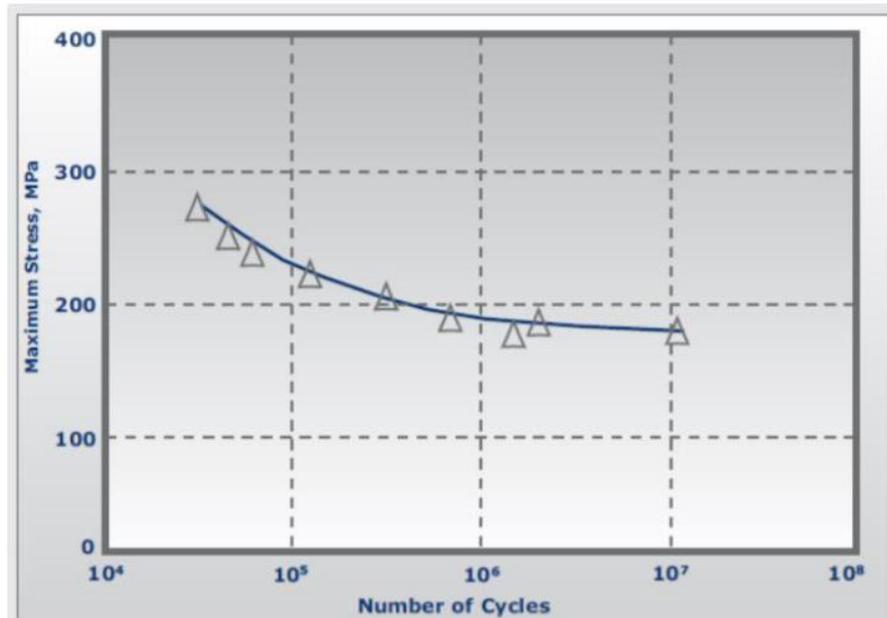
Como mencionado anteriormente, dois principais fatores podem estar causando um número excessivo de quebras desse componente, sendo eles a falha por fadiga e a carga de choque ou impacto. Visando a análise de solução para a falha por fadiga, é necessário que primeiro seja obtida a curva de estimativa de tempo de vida útil em termos de ciclos de tensão alternada do material do componente, a qual relaciona o número de ciclos (N) em relação às

amplitudes de tensões aplicadas em megapascals (S) para aço inoxidável 304, mostrada na Figura 28 (MOHAMMAD, 2014).

A metodologia utilizada para tal segue preceitos dos códigos da ASME (American Society of Mechanical Engineers), utilizando dados de fadiga de baixo-ciclo, realizadas em máquinas especiais com corpos de prova adequados para produzir uma Curva “S-N” conservativa, utilizando os fatores “ kIc ” (concentração de tensão) e “ kt ” (redução de resistência a fadiga).

Foi levado em consideração que soldas devem ser avaliadas através das suas eficiências. Este fator depende da qualidade da solda, variando entre 0 e 1, com 1 sendo uma solda sem falhas ou “*perfeita*” (NAS, 2013).

Figura 28 - Curva de estimativa de tempo de vida útil em termos de ciclos de tensão alternada para o material da haste de acionamento do dispositivo original



Fonte: Mohammad (2014)

A partir dos dados listados na Figura 28 é possível observar pelo gráfico que a “*tensão para vida infinita*”, ou seja, o limite de tensão para que o material não sofra os efeitos de fadiga, se encontra próximo dos 185 megapascals. Portanto, é desejável que o material não sofra nenhum esforço acima deste valor, caso se deseje evitar a fadiga do mesmo.

Novamente, para realizar a análise estrutural do componente, foi optado por utilizar a métrica no modelo numérico de elementos finitos (a malha). As métricas de malha utilizadas na análise estrutural da haste de acionamento do dispositivo original são mostrados na Tabela 25. O modelo em elementos finitos conteve 24.535 elementos com 38.976 nós, de forma que fosse possível representar o modelo de forma fiel, sem elementos desconexos ou deformados.

Para evitar singularidades na análise numérica, foi considerada uma força remota, ou seja, uma aplicada a toda uma face. Uma vez que força é um vetor, não é possível aplicar a força em um ponto infinitesimal do ponto de vista numérico, portanto é necessário delimitar uma área. Dessa forma, a força considerada não produz tensões diretas no ponto de aplicação (LEE, 2014).

Tabela 25 - Métricas de malha utilizadas na análise estrutural da haste de acionamento do dispositivo original

Indicadores métricos	Skewness	Orthogonal Quality
Mínimo	0,000086	-
Máximo	-	0,9892
Médio	0,2289	0,769
Desvio padrão	0,124	0,1214
Valor Ótimo (média)	0 – 0,3	0,6 – 1

Fonte: O Autor (2019)

A convergência da análise numérica foi garantida através de um refinamento completo da malha na estrutura virtual, analisando a variação da tensão (critério de Von-Mises), uma vez que as deformações não são um bom parâmetro para verificar a consistência da análise. Com isso, um aumento de cerca de 50% na quantidade de nós e de elementos resultou numa variação de menos de 4% no valor de tensão máximo da estrutura.

A análise estrutural por elementos finitos da pastilha não foi realizada em conjunto com a referente a esse componente, em virtude do alto custo computacional, por se tratar de um outro tipo de material, sendo realizada em separado. A sua análise estrutural se dará utilizando os conceitos de tribologia, sendo detalhados nas próximas sessões desse trabalho.

4.6.3 Análise Estrutural da Mola Principal do Dispositivo Original

Foi verificado que não há perdas de características devido ao uso do modelo de simetria, sendo mostrado o corpo da mola como um todo. A condição de contorno adotada (neste caso, o deslocamento da mola) será tomado como metade do total, e a simulação refletirá o mesmo resultado caso fosse realizada uma análise da mola completa. Com isso, foi considerado um deslocamento remoto, ou seja, deslocamento aplicado no centroide da face selecionada (MOAVENI, 1999) de dezessete milímetros, conforme indicado pela seta em amarelo, representando aproximadamente a metade do deslocamento total (vinte e nove milímetros).

A malha de elementos finitos contém 17.264 elementos com 87.696 nós, de forma a representar o modelo de forma fiel, sem elementos desconexos ou deformados. Caso fosse realizado uma análise completa, o número de elementos e nós seria praticamente o dobro, com um maior custo computacional, sendo também mais propenso a erros numéricos. As métricas de malha utilizadas na análise estrutural da mola principal do dispositivo original são mostrados na Tabela 26.

Tabela 26 - Métricas de malha utilizadas na análise estrutural da mola principal do dispositivo original

Indicadores métricos	Skewness	Orthogonal Quality
Mínimo	0.08	0.805
Máximo	0.40	0,9932
Médio	0.265	0.943
Desvio padrão	0.098	0.05
Valor Ótimo (média)	0 – 0.3	0.6 – 1

Fonte: O Autor (2019)

A convergência foi analisada de modo semelhante ao caso da haste de acionamento, onde se refinou a malha por completo, com um aumento em torno de 50% na quantidade de elementos, verificando-se a variação percentual das tensões nos lugares de maior variação. Como neste modelo a variação se comporta de modo uniforme, sendo considerada a variação na tensão máxima, que por sua vez teve valores em torno de 3.5%.

4.6.4 Análise Estrutural da Pastilha do Dispositivo Original

Conforme citado em seções anteriores, foi optado por não realizar a análise estrutural pelo método dos elementos finitos da pastilha em metal duro, em virtude da complexidade de sua modelagem, visando uma análise computacional, sendo assim realizada uma análise utilizando conceitos de tribologia.

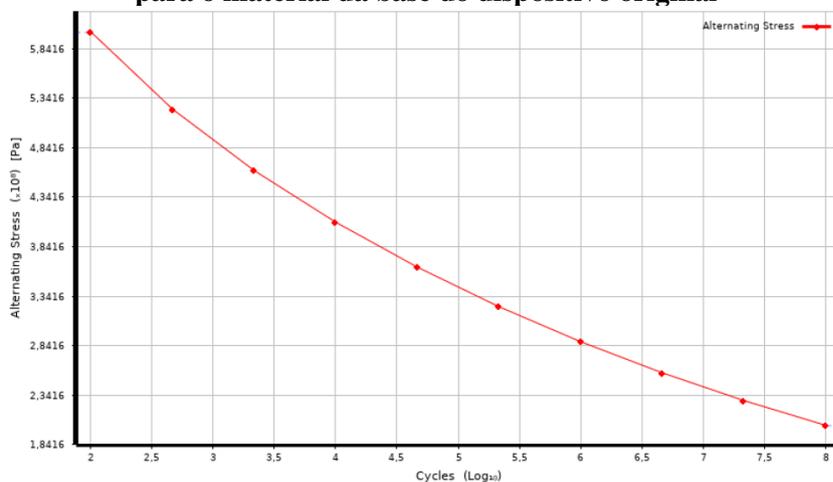
4.6.5 Análise Estrutural da Base do Dispositivo Original

Visando a análise estrutural da base do dispositivo original, foram utilizadas informações disponibilizadas pelo software ANSYS®, tendo em vista que o mesmo possui valores confiáveis. Sendo assim, as informações utilizadas para a realização das simulações foram:

- Densidade = $7,9 \text{ kg/m}^3$
- Limite de Resistência à Tração = 585 MPa
- Tensão de Escoamento = 240 MPa
- Módulo de Elasticidade = 193 MPa
- Coeficiente de Poisson = 0,27

Diante destes dados, foi possível plotar a partir do próprio software ANSYS® a Curva “S-N” do material utilizado, mostrada na Figura 29.

Figura 29 - Curva de estimativa de tempo de vida útil em termos de ciclos de tensão alternada para o material da base do dispositivo original



Fonte: O Autor (2019)

A partir dos dados listados na Figura 29 é possível observar pelo gráfico que a “*tensão para vida infinita*”, ou seja, o limite de tensão para que o material não sofra os efeitos de fadiga, se encontra próximo dos 200 megapascals. Portanto, é desejável que o material não sofra nenhum esforço acima deste valor, caso se deseje evitar a fadiga do mesmo.

Seguindo o mesmo padrão das análises anteriores em relação à qualidade da malha, foram realizados os estudos da malha deste componente assegurando-se os parâmetros “*Skewness*” e “*Orthogonal Quality*”. As métricas de malha utilizadas na análise estrutural da base do dispositivo original são mostrados na Tabela 27.

Tabela 27 - Métricas de malha utilizadas na análise estrutural da base do dispositivo original

Indicadores métricos	Skewness	Orthogonal Quality
Mínimo	0,00000385	-
Máximo	-	1
Médio	0.286	0.802
Desvio padrão	0.268	0.280
Valor Ótimo (média)	0 – 0.5	0.6 – 1

Fonte: O Autor (2019)

Observando percentualmente as variações da qualidade da malha, foi analisada a convergência da solução através do refinamento da malha nas regiões de maior gradiente de tensão no componente. Com isso, um aumento de cerca de 61,6 % na quantidade de nós e de elementos resultou numa variação em torno de 4,9% no valor de tensão máxima da estrutura.

4.7 DESENVOLVIMENTO DOS PROTÓTIPOS

Antes de desenvolver um novo dispositivo, foi necessário o desenvolvimento e testes em campo de protótipos, de forma a posteriormente aperfeiçoar e validar os métodos e processos utilizados, visando uma posterior fabricação do dispositivo desenvolvido em larga escala, com confiabilidade, garantido assim a sua performance.

Todos os componentes foram desenvolvidos com base nas dimensões e perfis obtidos a partir das fichas técnicas geradas por meio da metodologia de engenharia reversa, bem como das análises estruturais baseadas no método dos elementos finitos, quando aplicadas.

4.7.1 Desenvolvimento da Base

Visando o desenvolvimento da base do protótipo, foi necessária a utilização de processo de manufatura assistida por computador (CAM), de forma a garantir a confiabilidade dimensional e acabamento final do componente. Esse processo foi utilizado na confecção das ferramentas e “*gabaritos*” de fabricação necessárias às execuções dos processos de corte, fixação, dobramento e furação envolvidos, descritos na Tabela 28, os quais subsidiarão o desenvolvimento das matrizes de conformação mecânica que serão empregadas na fabricação da versão final do dispositivo desenvolvido.

Tabela 28 - Especificação de ferramentas e “*gabaritos*” de fabricação necessárias às execuções dos processos de corte, fixação, dobramento e furação envolvidos no desenvolvimento da base do protótipo

Ordem	Especificação	Finalidade
1	Ferramenta de Dobra	Execução do dobramento da chapa
2	“ <i>Gabarito</i> ” de Dobra	Suporte e fixação do processo de dobramento da chapa
3	Suporte para Rasgo	Suporte da estrutura e fabricação de rasgo na chapa

Fonte: O Autor (2019)

Todos os desenhos foram elaborados na plataforma CAD Solidworks® versão 2013 SP3.0, sendo processados posteriormente na plataforma CAM EdgeCAM® versão 2011 R2, onde foram gerados os respectivos códigos em comando numérico (CNC) para posterior alimentação nos equipamentos controlados por este tipo de sistema.

4.7.2 Desenvolvimento da Haste de Acionamento

Visando o desenvolvimento da haste de acionamento do protótipo, foi necessária a utilização de processos de usinagem convencional. Estes processos foram também utilizados na confecção das ferramentas e “*gabaritos*” de fabricação necessárias às execuções dos processos de corte, fixação, dobramento, furação e brasagem envolvidos, descritos na Tabela 29, os quais subsidiarão o desenvolvimento das matrizes de conformação mecânica que serão empregadas na fabricação da versão final do dispositivo desenvolvido.

Tabela 29 - Especificação de ferramentas e “gabaritos” de fabricação necessárias às execuções dos processos de corte, fixação, dobramento, furação e brasagem envolvidos no desenvolvimento da haste de acionamento do protótipo

Ordem	Especificação	Finalidade
1	Ferramenta de Dobra	Execução do dobramento do arame principal da haste
2	“Gabarito” de Fixação	Fixação e posicionamento da haste dobrada e pino articulado

Fonte: O Autor (2019)

4.7.3 Desenvolvimento do Conjunto Extrator

Visando o desenvolvimento do conjunto extrator do protótipo, foi necessária a utilização de processos de usinagem convencional, assim como processo de soldagem por brasagem. Estes processos foram também utilizados na confecção das ferramentas e “gabaritos” de fabricação necessárias às execuções dos processos de dobramento e brasagem envolvidos, descritos na Tabela 30, os quais subsidiarão o desenvolvimento das matrizes de conformação mecânica que serão empregadas na fabricação da versão final do dispositivo desenvolvido.

Tabela 30 - Especificação de ferramentas e “gabaritos” de fabricação necessárias às execuções dos processos de dobramento e brasagem envolvidos no desenvolvimento do conjunto extrator do protótipo

Ordem	Especificação	Finalidade
1	Ferramenta de Dobra	Execução do dobramento da chapa de articulação do conjunto
2	“Gabarito” de Fixação	Fixação e posicionamento da cabeça do conjunto e pastilha

Fonte: O Autor (2019)

4.7.4 Desenvolvimento do Eixo do Conjunto Extrator

Visando o desenvolvimento do eixo do conjunto extrator do protótipo, foi necessária a utilização de processo de usinagem convencional por torneamento, não sendo necessária a confecção de ferramentas e “gabaritos” de fabricação destinadas às execuções do processo.

4.7.5 Desenvolvimento dos Pinos de Fixação da Estrutura

Visando o desenvolvimento dos pinos de fixação da estrutura do protótipo, foi necessária a utilização de processo de usinagem controlado por comando numérico (CNC), com base em programação específica gerada manualmente por operador, de forma a garantir a

confiabilidade dimensional e acabamento final do componente, não sendo necessária a confecção de ferramentas e “*gabaritos*” de fabricação destinadas às execuções do processo.

4.7.6 Desenvolvimento da Haste de Transmissão

Visando o desenvolvimento da haste de transmissão do protótipo, foi necessária a utilização de processos de corte e dobramento. Os processos utilizados na confecção das ferramentas e “*gabaritos*” de fabricação necessárias às execuções destes processos envolvidos, descritos na Tabela 31, foram usinagem convencional e soldagem.

Tabela 31 - Especificação de ferramentas e “*gabaritos*” de fabricação necessárias às execuções dos processos de corte e dobramento envolvidos no desenvolvimento da haste de transmissão do protótipo

Ordem	Especificação	Finalidade
1	Ferramenta de Dobra	Execução do dobramento do arame cortado
2	“ <i>Gabarito</i> ” de Fixação	Fixação e posicionamento do arame a ser dobrado

Fonte: O Autor (2019)

4.8 FABRICAÇÃO DOS PROTÓTIPOS

Antes de fabricar um novo dispositivo em larga escala, foi necessária a fabricação e testes em campo de protótipos, de forma a posteriormente aperfeiçoar e validar os métodos, processos, “*gabaritos*” e ferramentas utilizadas, visando o desenvolvimento das matrizes de conformação mecânica que subsidiarão a fabricação da versão final do dispositivo desenvolvido, garantido assim a sua performance. Ao fim de todas as fabricações, as medidas são conferidas por meio de instrumentos de precisão, listados na Tabela 32, regulados pelos certificados de calibração número 2455/2019 e 2448/2019, respectivamente, emitidos pela Empresa de calibração, ambos em 28/02/2019.

Tabela 32 - Instrumentos de precisão utilizados na conferência de medidas durante a fabricação dos componentes do protótipo

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Paquímetro Digital Quadrimensional	Digimess	-	-
Micrômetro Externo	Digimess	110-200	50363773

Fonte: O Autor (2019)

4.8.1 Fabricação da Base

Visando a fabricação da base do protótipo, assim como dos “*gabaritos*” e ferramentas listadas da Tabela 28, foi necessária a utilização de processo de usinagem controlada por CNC, com base em programação específica gerada a partir de plataforma CAM.

4.8.1.1 Aparelhagem

A aparelhagem necessária à execução da fabricação da base do protótipo, assim como dos “*gabaritos*” e ferramentas de fabricação necessárias às execuções dos processos de corte, fixação, dobramento e furação envolvidos está listada na Tabela 33, juntamente com suas especificações técnicas.

Tabela 33 - Aparelhagem necessária à execução da fabricação da base do protótipo, “*gabaritos*” e ferramentas de fabricação necessárias às execuções dos processos de corte, fixação, dobramento e furação envolvidos

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Centro de Usinagem CNC	Romi	D1250	016-009634-456
Fresa de Topo diâmetro 8mm em aço rápido (HSS)	Sandvik	-	-
Fresa de Topo diâmetro 4mm em aço rápido (HSS)	Sandvik	-	-
Broca diâmetro 8mm em aço rápido (HSS)	Sandvik	-	-
Broca diâmetro 5mm em aço rápido (HSS)	Sandvik	-	-

Fonte: O Autor (2019)

4.8.1.2 Procedimento

Com base nos códigos de programação gerados a partir da plataforma CAM utilizada, foi confeccionada no centro de usinagem CNC, por meio das ferramentas listadas na Tabela 33, uma base de apoio à chapa a ser cortada e furada, em material plástico, com as mesmas dimensões e formato do componente final, de forma a obter-se uma melhor fixação nos momentos dos processos de corte e furação e com isso não serem gerados problemas dimensionais e de acabamento. Dessa forma, a chapa com dimensões predeterminadas é fixada

à base e usinada pelas mesmas ferramentas, tendo como produto final o formato e dimensões programadas e desenhadas na plataforma CAD.

Em seguida são fabricados os “*gabaritos*” e ferramentas listadas na Tabela 28, com base nos seus respectivos códigos de programação, assim como uma ferramenta destinada à confecção de repuxo para inserção do ilhós da mola central. A chapa cortada e furada é então submetida ao dobramento.

Por último, a chapa cortada, furada e dobrada e submetida a um rebitemento destinado à posterior inserção de arruela fixa de deslizamento de pino, sendo todo o seu perfil conferido por meio de “*gabaritos*” específicos.

4.8.2 Fabricação da Haste de Acionamento

Visando a fabricação da haste de acionamento do protótipo, assim como dos “*gabaritos*” e ferramentas listadas da Tabela 29, foi necessária a utilização de processos de usinagem convencional.

4.8.2.1 Aparelhagem

A aparelhagem necessária à execução da fabricação da haste de acionamento do protótipo, assim como dos “*gabaritos*” e ferramentas de fabricação necessárias às execuções dos processos de corte, fixação, dobramento, furação e brasagem envolvidos está listada na Tabela 34, juntamente com suas especificações técnicas.

Tabela 34 - Aparelhagem necessária à execução da fabricação da haste de acionamento do protótipo, “*gabaritos*” e ferramentas de fabricação necessárias às execuções dos processos de corte, fixação, dobramento, furação e brasagem envolvidos

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Prensa Hidráulica	Gedore	-	-
Arco de Serra	Gedore	-	-
Serra de Fita	Starret	-	-

Fonte: O Autor (2019)

4.8.2.2 Procedimento

Inicialmente a barra com diâmetro predeterminado é seccionada por meio de serra de fita, originando assim o perfil retilíneo da haste de acionamento, sendo em seguida posicionada sob a ferramenta de dobra listada na Tabela 29, a qual encontra-se apoiada na estrutura da prensa hidráulica. O cilindro atuará sobre a barra seccionada, dobrando-a de acordo com o perfil da ferramenta de dobra, até o limite especificado.

Por último, a haste de acionamento dobrada é posicionada no “*gabarito*” de fixação, de forma a garantir o correto posicionamento entre o pino e a mesma, no momento da soldagem. Em seguida é realizada a união da haste de acionamento e seu pino, por meio de brasagem.

4.8.3 Fabricação do Conjunto Extrator

Visando a fabricação do conjunto extrator do protótipo, assim como dos “*gabaritos*” e ferramentas listadas da Tabela 30, foi necessária a utilização de processos de usinagem convencional, assim como processo de soldagem por brasagem.

4.8.3.1 Aparelhagem

A aparelhagem necessária à execução da fabricação do conjunto extrator do protótipo, assim como dos “*gabaritos*” e ferramentas de fabricação necessárias às execuções dos processos de dobramento e brasagem envolvidos está listada na Tabela 35, juntamente com suas especificações técnicas.

Tabela 35 - Aparelhagem necessária à execução da fabricação do conjunto extrator do protótipo, “*gabaritos*” e ferramentas de fabricação necessárias às execuções dos processos de processos de dobramento e brasagem envolvidos

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Fresadora Universal	Sunlike	-	-
Fresa de Topo diâmetro 8mm em metal duro	Sandvik	-	-
Fresa de Topo diâmetro 4mm em metal duro	Sandvik	-	-

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Fresa de Disco diâmetro 2mm em aço rápido (HSS)	Pilama	-	-
Broca diâmetro 8mm em aço rápido (HSS)	Sandvik	-	-
Broca diâmetro 5,2mm em aço rápido (HSS)	Sandvik	-	-
Broca diâmetro 5mm em aço rápido (HSS)	Sandvik	-	-
Temax 27mm com inserto em metal	Sandvik	-	-
Máquina de Solda com Cilindro	Lincoln Electric	Invertec V275-S	U1070812987
Solda de Prata 12%	Oxigen	-	-
Vareta para Solda de Prata 12%	-	-	-

Fonte: O Autor (2019)

4.8.3.2 Procedimento

Inicialmente uma peça bruta quadrática é fresada com o perfil desejado à cabeça do conjunto extrator, sendo posteriormente realizado um furo passante pela broca, assim como rasgos paralelo e transversal ao furo passante, com espessuras predeterminadas.

Em seguida, uma chapa bruta é fresada, furada, fixada e dobrada em volta da ferramenta de dobra listada na Tabela 30, por meio de batidas contra, de forma ter-se a configuração final desejada da chapa de articulação do conjunto.

Por último, a cabeça e a chapa de articulação são posicionadas no “*gabarito*” de fixação listado na Tabela 30, para que possam ser unidos por processo de brasagem. Em seguida a pastilha é unida à cabeça pelo mesmo processo de soldagem.

4.8.4 Fabricação do Eixo do Conjunto Extrator

Visando a fabricação do eixo do conjunto extrator do protótipo, foi necessária a utilização de processo de usinagem convencional por torneamento.

4.8.4.1 Aparelhagem

A aparelhagem necessária à execução da fabricação do eixo do conjunto extrator do protótipo está listada na Tabela 36, juntamente com suas especificações técnicas.

Tabela 36 - Aparelhagem necessária à execução da fabricação do eixo do conjunto extrator do protótipo

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Torno Mecânico Convencional	Magnum-CUT	FEL-1640GZJ	200605068
Ferramenta de Torneamento em metal duro	Sandvik	-	-
Ferramenta de Torneamento em aço rápido (HSS)	Toll Master	-	-
Fresadora Universal	Sunlike	-	-
Broca diâmetro 2 mm em aço rápido (HSS)	Sandvik	-	-

Fonte: O Autor (2019)

4.8.4.2 Procedimento

Inicialmente uma peça bruta cilíndrica é centralizada no torno mecânico, por meio do sistema de contraponto. Em seguida é realizado o processo de torneamento e acabamento pelas ferramentas, até ser atingido o diâmetro especificado. Por último, a peça é fixada na fresadora universal, onde é executada a sua furação.

4.8.5 Fabricação dos Pinos de Fixação da Estrutura

Visando a fabricação dos pinos de fixação da estrutura do protótipo, foi necessária a utilização de processo de usinagem controlado por comando numérico, com base em programação específica gerada manualmente por operador.

4.8.5.1 Aparelhagem

A aparelhagem necessária à execução da fabricação dos pinos de fixação da estrutura do protótipo está listada na Tabela 37, juntamente com suas especificações técnicas.

Tabela 37 - Aparelhagem necessária à execução da fabricação dos pinos de fixação da estrutura do protótipo

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Torno CNC	Romi	Centur 30D	016-011009-448
Ferramenta de Torneamento em metal duro	Sandvik	-	-

Fonte: O Autor (2019)

4.8.5.2 Procedimento

Os códigos de programação são inseridos pelo operador no torno CNC, de forma manual. Em seguida, o operador realiza todo o sequenciamento de atividades de configuração do equipamento e correto posicionamento da peça bruta, necessários à sua usinagem, inicializando assim o processo de fabricação do componente, com o monitoramento e ajuste de parâmetros de corte, de forma constante, por parte do operador, até que sejam atingidos os diâmetros e perfis especificados.

4.8.6 Fabricação da Haste de Transmissão

Visando a fabricação da haste de transmissão do protótipo, foi necessária a utilização de processo de corte e dobramento. Os processos utilizados na confecção das ferramentas e “*gabaritos*” de fabricação necessárias às execuções destes processos envolvidos, descritos na Tabela 31, foram usinagem convencional e soldagem.

4.8.6.1 Aparelhagem

A aparelhagem necessária à execução da fabricação da haste de transmissão do protótipo, assim como dos “*gabaritos*” e ferramentas de fabricação necessárias às execuções dos processos de corte e dobramento envolvidos está listada na Tabela 38, juntamente com suas especificações técnicas.

Tabela 38 - Aparelhagem necessária à execução da fabricação da haste de acionamento do protótipo, “gabaritos” e ferramentas de fabricação necessárias às execuções corte e dobramento envolvidos

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Morsa de Bancada	Gedore	-	-
Arco de Serra	Gedore	-	-
Serra de Fita	Starret	-	-

Fonte: O Autor (2019)

4.8.6.2 Procedimento

Inicialmente o arame com diâmetro predeterminado é seccionado por meio de serra de fita, originando assim o perfil retilíneo da haste de transmissão, sendo em seguida posicionada entre o “gabarito” de fixação e a ferramenta de dobra, listadas na Tabela 31. Em seguida, todo o conjunto é colocado na estrutura de fixação da morsa de bancada, onde se dará o dobramento do arame, mediante fechamento da estrutura da morsa, até a formatação especificada ser atingida.

4.9 DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE TRATAMENTO SUPERFICIAL

O processo de tratamento superficial foi desenvolvido com base na utilização de compostos especiais que aumentam a eficiência da aderência do produtos eletrodepositados aos componentes, proporcionando alto nivelamento desde a alta até a baixa densidade de corrente, ou seja, operando em uma alta faixa de densidade de corrente, produzindo depósitos claros e uniformes.

Os depósitos produzidos são dúcteis e ativos, o que permite a cromação subsequente, totalmente livre de anomalias no processos. Este processo pode ser utilizado tanto em instalações com banhos estáticos quanto instalações com banhos rotativos, sem grandes necessidades de mudanças em sua composição química.

Todas as informações relativas ao processo são baseadas “*know-how*”, incluindo operações de campo e práticas de laboratório. As condições operacionais do processo estão listadas na Tabela 39.

Tabela 39 - Especificações das condições operacionais do processo de tratamento superficial do protótipo

Elemento Químico / Parâmetro	Faixa de Utilização	Valor Ideal
Sulfato de Níquel	200,00 a 300 g/l	250,00 g/l
Cloreto de Níquel	90,00 a 120,00 g/l	90,00 g/l
Ácido Bórico	45,00 a 50,00 g/l	45,00 g/l
Elemento Nivelador	20,00 a 40,00 ml/l	25,00 ml/l
Elemento Abrilhantador	0,50 a 1,00 ml/l	0,50 ml/l
Elemento Molhador	6,00 a 10,00 ml/l	8,00 ml/l
Relação Anodo / Catodo	2:1	2:1
Temperatura	45,00 a 70,00 °C	56,00 °C
pH	4,00 a 4,50	4,00
Densidade de Corrente	0,50 a 10,00 A/dm ²	4,50 A/dm ²
Tensão para Banho Estático	4,00 a 6,00 Volts	5,00 Volts
Tensão para Banho Rotativo	9,00 a 15,00 Volts	12,00 Volts
Agitação	A ar ou mecânica	A ar ou mecânica
Filtração	Contínua	Contínua

Fonte: O Autor (2019)

4.9.1 Dados Operacionais do Processo

Os dados operacionais relacionados ao processo são listados a seguir, assim como suas bases conceituais e respectivas finalidades.

1. **Sulfato de Níquel:** é a principal fonte de íons de níquel no banho. Pode ser adicionado ao banho normalmente;
2. **Cloreto de Níquel:** aumenta a condutividade do banho, permitindo altas densidades de correntes catódicas. Melhora os depósitos nas baixas densidades de corrente, sendo necessário para manter uma corrosão anódica adequada. Caso o cloreto de níquel não esteja disponível temporariamente, o teor de cloreto poderá ser mantido para uma boa corrosão anódica, usando-se ácido clorídrico, para ajuste de pH no lugar do ácido sulfúrico. A quantidade de ácido clorídrico a ser adicionado deve ser duas vezes maior que a quantidade de ácido sulfúrico utilizado normalmente para o ajuste de pH;

3. **Ácido Bórico:** auxilia na prevenção dos problemas de queima na alta densidade de corrente e descascamento. Exerce também efeito benéfico no brilho, ductibilidade e aderência;
4. **Elemento Molhador:** oferece propriedade umectante. Contudo, peças com conformidades que fazem aprisionamento de ar ou gases, ou de excessiva contaminação orgânica, a corrosão por cavidades ou “*pitting*” poderá ocorrer;
5. **Elemento Abrilhantador:** é um aditivo de forte efeito abrilhantador. Uma baixa concentração resultará na perda total de nivelamento e brilho. Deve ser adicionado na base de 0,2 a 0,5 litros /10.000 Ampere-hora (Ah), em períodos de intervalos de trabalho. O elemento abrilhantador não é removido por tratamento de carvão ativo;
6. **Elemento Nivelador:** atua no nivelamento, oferecendo alta flexibilidade. Dessa forma, o controle se torna menos crítico. Seu consumo está estimado na faixa de 1,5 a 2,0 litros / 10.000 Ampere-hora, sendo estes valores suficientes para mantê-lo dentro dos parâmetros;
7. **Controle de pH:** baixo pH da solução causa depósitos foscos em toda a extensão e resultará em um alto consumo de abrilhantadores para se manter um trabalho aceitável. Alto pH promove melhor brilho e nivelamento, mas causa precipitação do ferro e de outros metais. Valores de pH acima de 4,2 produzirão depósitos brilhantes e com nivelamento, porém podem reduzir o poder de cobertura do cromo em peças com geometrias complexas;
8. **Temperatura:** as temperaturas baixas requerem um pouco mais de corrente. Por outro lado, temperaturas mais elevadas oferecem melhor condutividade, permitindo que se trabalhe com voltagens mais baixas;
9. **Filtração:** a filtração contínua com carvão ativo é essencial para assegurar uma boa qualidade nos depósitos de níquel. Normalmente o filtro é recoberto e depois carregado com 0,3 gramas por litro (g/l) de carvão ativo a cada semana. O carvão ativo pode ser adicionado semanalmente até que o fluxo caia cerca da metade da capacidade de

filtração, ou até que a capacidade do filtro trabalhando com carvão atinja o seu limite. É recomendado o uso de tanque reserva para filtração do banho;

10. **Anodos:** os anodos “*Níquel-S*” ou “*catodinhos 2x2*” em cestas de titânio são as alternativas mais econômicas e melhoram a eficiência anódica. Outros tipos de anodos, tais como barras, ovais, entre outros, podem ser utilizados;
11. **Serpentinas de Aquecimento:** deverão ser construídas de grafites, titânio ou quartzo. Chumbo ou aço inoxidável não são recomendados como material base para a construção de qualquer equipamento que venha a entrar em contato com o banho;
12. **Sacos de Anodos:** sacos de algodão, dynel, dacron ou polipropileno (PP) podem ser utilizados no processo. Os mesmos deverão ser pelo menos de cinco a dez centímetros mais compridos do que as cestas de titânio, para conter as borras residuais. Para anodos de níquel tipo “*S.D.*”, são recomendados um duplo saco consistindo de um interno de flanela e outro externo de dynel ou polipropileno. Antes de utilizar sacos novos de polipropileno, estes deverão ser lavados e em seguida lixiviados em uma solução de hidróxido de sódio com concentração a 20 g/l e temperatura de 80 °C, sendo posteriormente neutralizados em uma solução de ácido clorídrico 10% e enxaguados em água limpa;
13. **Tanques:** as soluções podem ser contidas em tanques de ferro com revestimento de Policloreto de Vinila (PVC), polipropileno ou borracha técnica previamente aprovada, como ebonite. Tanques revestidos com chumbo não são recomendados. Quando um tanque novo é instalado, os procedimentos de limpeza e pré-tratamento recomendados devem ser estendidos ao tanque de estocagem. Os tanques de eletrodeposição devem ser aterrados ao chão para que qualquer possível fonte de corrente ou carga elétrica devido ao uso de tubos de isolamento inadequada, linhas de aquecimento, linhas de alimentação, entre outras, sejam evitadas;
14. **Gancheiras:** o “*engacheiramento*” adequado é essencial em uma linha de níquel-cromo. Gancheiras com contatos firmes e de alta qualidade devem ser usados no processo;

15. **Informações de Segurança:** o banho é um produto ácido. Ao utilizar o produto, deve-se utilizar equipamento de proteção individual (EPI), assim como deve ser evitado o contato dos produtos com pele e olhos. E caso de contato acidental, deve-se lavar a região afetada com água em excesso e prover compressas com um solução de bicarbonato de sódio e em seguida procurar um atendimento médico.

4.9.2 Montagem do Banho

Todo o tanque é limpo com solução de ácido clorídrico 10% e escovado para receber a montagem do banho, sendo enxaguado com água corrente e limpa. A sequência de atividades para montagem do banho é descrita a seguir:

1. Adicionar ao tanque água com baixo teor de calcário e isenta de impurezas até metade do volume e aquecê-la até 60 °C;
2. Adicionar o ácido bórico e agitar até a completa dissolução;
3. Adicionar o cloreto de níquel e o sulfato de níquel sob agitação até completa dissolução;
4. Adicionar água até 80 % do volume total do tanque;
5. Adicionar carvão ativo na bomba atrelada ao tanque e circular a solução de três a quatro horas, mantendo o banho aquecido a 60 °C;
6. Ajustar o pH para um valor entre 4,00 e 5,00, adicionando em seguida os aditivos sob agitação, colocar os anodos e avolumar o tanque;
7. Os aditivos são adicionados separadamente.

4.9.3 Aplicação do Processo de Tratamento Superficial

Visando a correta aplicação do processo de tratamento superficial desenvolvido, foi necessária a realização de diversas atividades em sequência pré-determinada, observando as aplicações das quantidades corretas dos produtos químicos utilizados, controle dos parâmetros dos equipamentos, os respectivos interstícios de tempo para cada fase, assim como entre as diversas fases do processo, de forma a garantir a confiabilidade e eficácia do mesmo.

4.9.3.1 Aparelhagem

A aparelhagem necessária à aplicação processo de tratamento superficial está listada na Tabela 40, juntamente com suas especificações técnicas.

Tabela 40 - Aparelhagem necessária à aplicação processo de tratamento superficial

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Retificador de Corrente e Tensão	WG Retificadores	-	-
Tanque de Imersão	-	-	-
Centrífuga	-	-	-

Fonte: O Autor (2019)

4.9.3.2 Procedimento

Inicialmente todos os componentes são lixados e polidos, sendo em seguida desengraxados por imersão à quente a 90 °C, por dez minutos. Após o desengraxamento, os componentes são lavados em água corrente por trinta segundos, onde depois passarão pelo processo de ativação por decapagem, sendo imersos em tanque contendo solução de ácido clorídrico 3% por cinco minutos.

Após o processo de ativação por decapagem, os componentes são novamente lavados em água corrente por trinta segundos. Em seguida as placas de níquel bruto são inseridas no tanque com sistema de retificação de corrente e tensão, sendo aplicados os parâmetros de processo ao equipamento retificador.

Após a estabilização dos valores de tensão e corrente no equipamento, os componentes são inseridos na solução de níquel em fluxo corrente no tanque por quarenta minutos, sendo em seguida lavados mais uma vez em água corrente por trinta segundos.

Por último, os componentes são secados em centrífuga por quinze minutos, finalizando o processo. Para fins de comprovação da aderência do níquel aos componentes, os mesmos são submetidos a um novo processo de lixamento, de forma a comprovar a eficácia do processo.

4.10 PROPOSTA DE GERENCIAMENTO DE MUDANÇAS NO EQUIPAMENTO (MOC)

Como requisito à instalação dos protótipos no equipamento, é necessária a execução de um processo de MOC (Management of Change) ou gerenciamento de mudança, tendo em vista que o projeto propõe alterações em componentes do sistema de extração do equipamento, em atendimento aos requisitos da metodologia WCM. Para tal, é formado um comitê de avaliação, composto por integrantes das equipes de segurança, qualidade, manufatura (produção), manutenção, recursos humanos e WCM. São analisados todos os riscos atrelados ao projeto, englobando as análises de pontos críticos pelas áreas citadas.

4.11 ANÁLISES DE DESIGN HIGIÊNICO

Em se tratando de indústria alimentícia, é requisito normativo de segurança de alimentos a análise de design higiênico dos dispositivos, de forma a avaliar a existência de possíveis pontos de acúmulo de microrganismos, os quais podem contaminar o produto, tendo em vista que os dispositivos têm contato direto com o mesmo.

4.12 TESTES DOS PROTÓTIPOS EM CAMPO

Nessa seção serão descritos os processos de instalação dos protótipos no equipamento, bem como os testes de funcionamento e acompanhamento da performance e vida útil dos mesmos.

Para que seja possível a realização dos testes dos protótipos desenvolvidos em campo, é necessário que sejam realizadas atividades gerenciais no tocante à mudanças no equipamento e análises de design higiênico pela equipe de qualidade, de forma a garantir a sua confiabilidade, assim como cumprir os requisitos normativos de segurança de alimentos.

Diante das respectivas aprovações, dá-se em seguida a instalação dos protótipos no equipamento, de forma a acompanhar e analisar os critérios de performance e tempo de vida útil dos mesmos.

4.12.1 Instalação dos Protótipos no Equipamento

A instalação dos protótipos é relativamente simples, sendo realizada pela própria equipe de operação do equipamento, aproveitando os intervalos para limpeza do mesmo, de forma a não impactar o plano de produção do linha.

Antes de serem fixados no equipamento por meio das suas barras extratoras, os protótipos são inspecionados metrologicamente sendo depois embebidos em solução de limpeza pela equipe de operação, de forma a verificar requisitos dimensionais de inserção do palito nos mesmos e eliminar microrganismos na estrutura, respectivamente. Em seguida, quatro protótipos são fixados em barra extratora previamente selecionada (barra número 49), juntamente com quatro dispositivos originais nunca utilizados, em posições centralizadas predeterminadas, conforme listado na Tabela 41. Cada barra extratora possui quatorze posições, com sequenciamento numeral ou literal.

Foram escolhidas as posições centrais para que os dispositivos não venham a sofrer influências do processo, o que é recorrente em dispositivos localizados nas extremidades das barras extratoras, mostrando uma falsa ineficiência dos mesmos. A instalação em paralelo de dispositivos originais nunca utilizados se deu com o intuito de comparar suas vidas úteis com as dos protótipos.

Tabela 41 - Posicionamento inicial de protótipos e dispositivos originais em barra extratora selecionada

Posição da Barra Extratora	Nomenclatura do Protótipo / Dispositivo Original	Características
4 (D)	Dispositivo Original 1 (DO1)	Dispositivo Original Nunca Utilizado
5 (E)	Dispositivo Original 2 (DO2)	Dispositivo Original Nunca Utilizado
6 (F)	Dispositivo Original 3 (DO3)	Dispositivo Original Nunca Utilizado
7 (G)	Dispositivo Original 4 (DO4)	Dispositivo Original Nunca Utilizado
8 (H)	Protótipo 4 (P4)	Protótipo com Tratamento Superficial Aplicado
9 (I)	Protótipo 5 (P5)	Protótipo com Tratamento Superficial Aplicado
10 (J)	Protótipo 6 (P6)	Protótipo com Tratamento Superficial Aplicado
11 (K)	Protótipo 7 (P7)	Protótipo com Tratamento Superficial Aplicado

Fonte: O Autor (2019)

Em se constatando a comprovação de boa performance dos dispositivos em decorrência das possíveis influências do processo, mais seis protótipos são fixados na barra extratora selecionada, juntamente com os quatro dispositivos originais nunca utilizados, já instalados. Com isso tem-se uma barra extratora completa, com as quatorze posições, destinadas ao acompanhamento e análise de critérios de performance e tempo de vida útil, conforme listado na Tabela 42.

Tabela 42 - Posicionamento final de protótipos e dispositivos originais em barra extratora para o acompanhamento e análise de critérios de performance e tempo de vida útil

Posição da Barra Extratora	Nomenclatura do Protótipo / Dispositivo Original	Características
1 (A)	Protótipo 1 (P1)	Protótipo com Tratamento Superficial Aplicado
2 (B)	Protótipo 2 (P2)	Protótipo sem Tratamento Superficial Aplicado
3 (C)	Protótipo 3 (P3)	Protótipo sem Tratamento Superficial Aplicado
4 (D)	Dispositivo Original 1 (DO1)	Dispositivo Original Nunca Utilizado
5 (E)	Dispositivo Original 2 (DO2)	Dispositivo Original Nunca Utilizado
6 (F)	Dispositivo Original 3 (DO3)	Dispositivo Original Nunca Utilizado
7 (G)	Dispositivo Original 4 (DO4)	Dispositivo Original Nunca Utilizado
8 (H)	Protótipo 4 (P4)	Protótipo com Tratamento Superficial Aplicado
9 (I)	Protótipo 5 (P5)	Protótipo com Tratamento Superficial Aplicado
10 (J)	Protótipo 6 (P6)	Protótipo com Tratamento Superficial Aplicado
11 (K)	Protótipo 7 (P7)	Protótipo com Tratamento Superficial Aplicado
12 (L)	Protótipo 8 (P8)	Protótipo sem Tratamento Superficial Aplicado
13 (M)	Protótipo 9 (P9)	Protótipo com Tratamento Superficial Aplicado
14 (N)	Protótipo 10 (P10)	Protótipo com Tratamento Superficial Aplicado

Fonte: O Autor (2019)

Em seguida é realizado o teste de inserção de palito nos dispositivos, onde os mesmos são acionados por meio das hastes sendo inseridos palitos na posição vertical de forma centralizada e sem inclinações laterais, até uma posição predeterminada. Em seguida os palitos são deslocados lateral e frontalmente, de forma a simular a resistência mecânica no momento da extração, assim como possíveis vibrações no equipamento.

Caso o palito não consiga ser removido manualmente do dispositivo, significa que o mesmo não apresenta folgas que comprometeriam a extração do picolé ou mesmo ocasionaria

uma quebra abrupta do palito, quando em contato com o mesmo. Por último, a barra extratora é instalada no equipamento, na mesma posição a qual foi retirada.

4.12.2 Acompanhamento e Análise de Critérios de Performance e Tempo de Vida Útil

Após a realização da instalação dos protótipos no equipamento, é de suma importância a realização de testes de funcionamento no mesmo, assim como o acompanhamento diuturno da sua performance, de forma a identificar possíveis problemas relativos a acionamento, transporte ou extração ineficiente dos picolés dos respectivos moldes, falha mecânica e corrosão dos materiais dos componentes, bem como constatar a sua vida útil real em ciclos ou em horas, confrontando estes dados com os encontrados nas análises estruturais, durante a concepção do projeto. Esse acompanhamento é realizado por meio de ficha específica de controle estatístico de processo (CEP).

Após a realização da instalação da barra extratora contendo os protótipos no equipamento, são realizados testes de funcionamento nos mesmos, já com o equipamento funcionando em “modo teste”, sem produto, onde a barra de acionamento dos dispositivos para soltura de picolés nos envoltórios vai de encontro às hastes de acionamento dos dispositivos instalados na barra extratora selecionada, fazendo como que estes executem “em vazio” o movimento de abertura.

Em seguida é realizado todo o procedimento de início de produção do equipamento. Com o equipamento já em produção, é realizado o acompanhamento dos processos de extração e transporte do produto por parte dos dispositivos instalados na barra extratora selecionada, sendo os resultados anotados em ficha específica de controle estatístico de processo, três vezes a cada oito horas (a cada turno de trabalho da operação).

4.13 VALIDAÇÃO DOS PROTÓTIPOS

Após a realização de todas as análises gerenciais e de qualidade, testes e acompanhamentos em campo, não se constatando dentro de um considerável intervalo de tempo problemas relativos à performance do protótipo, o mesmo é aprovado e o seu processo de MOC validado, sendo assim autorizada a fabricação em lote.

4.14 ESPECIFICAÇÕES DOS MATERIAIS DO DISPOSITIVO DE EXTRAÇÃO DESENVOLVIDO

As especificações dos materiais utilizados na versão final do dispositivo desenvolvido estão listadas na Tabela 43.

Tabela 43 - Especificações dos materiais utilizados na fabricação na versão final do dispositivo desenvolvido

Especificação do Material
Chapa Inox AISI 420 TR POL 1.00 X 300 X 1000 mm
Barra em Aço AISI 420 Cilíndrica Diâmetro 5 mm
Barra em Aço AISI 420 Cilíndrica Diâmetro 6 mm
Barra em Aço AISI 420 Cilíndrica Diâmetro 6,35 mm
Barra em Aço AISI 420 Cilíndrica Diâmetro 9,53 mm
Barra em Aço AISI 420 Cilíndrica Diâmetro 11,11 mm
Barra em Aço AISI 420 Cilíndrica Diâmetro 12,70 mm
Barra em Aço AISI 420 Cilíndrica Diâmetro 22,22 mm
Barra em Aço AISI 420 Quadrada Espessura 15,87 mm

Fonte: O Autor (2019)

4.15 ANÁLISES DE ESPECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS DO DISPOSITIVO DE EXTRAÇÃO DESENVOLVIDO SEM APLICAÇÃO DO TRATAMENTO TÉRMICO

O objetivo destas análises é validar, com alto nível de exatidão e detalhe, as especificações técnicas dos materiais que irão compor os componentes do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico, pelo uso de ensaios destrutivos e não destrutivos, os quais provêm meios para a comprovação de seus elementos químicos e suas respectivas composições percentuais, verificação de micrografias e fases constantes, assim como a observância de comportamentos no que se diz respeito às suas resistências à perfuração e tração mecânica.

4.15.1 Análises de Espectrometria por Emissão Óptica

4.15.1.1 Normas de Referência e Documentos Complementares

Foram utilizadas as mesmas normas de referência e documentos complementares das análises de espectrometria por emissão óptica dos materiais do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido.

4.15.1.2 Aparelhagem

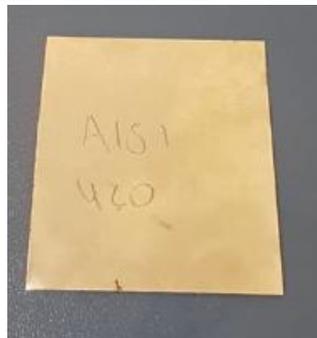
Foi utilizada a mesma aparelhagem das análises de espectrometria por emissão óptica dos materiais do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido.

4.15.1.3 Preparação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova para execução das análises foram obtidos a partir de materiais selecionados e destinados à fabricação dos componentes do dispositivo desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico, sendo cada material inspecionado dimensionalmente e visualmente quanto à sua integridade física, em formatos de chapa e cilíndrico, conforme mostrado na Figura 30, sendo identificados conforme a Tabela 44, com suas respectivas dimensões.

Figura 30 - Separação dos corpos de prova utilizados nas análises de espectrometria por emissão óptica dos materiais do dispositivo desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico:

(a) Amostra em formato de chapa; (b) Amostra em formato cilíndrico



(a)



(b)

Fonte: O Autor (2020)

Tabela 44 - Identificação dos corpos de prova utilizados nas análises de espectrometria por emissão óptica dos materiais do dispositivo desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico

Nº Corpo de Prova	Especificação do Material	Formato da Amostra	Dimensões			
			Diâmetro (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Altura (mm)
AM-17	Aço AISI 420	Chapa	-	100	100	1
AM-18	Aço AISI 420	Cilindro	40	-	-	100

Fonte: O Autor (2020)

4.15.1.4 Procedimento

Foi utilizado o mesmo procedimento das análises de espectrometria por emissão óptica dos materiais do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido.

4.15.2 Caracterização Microestrutural

4.15.2.1 Normas de Referência e Documentos Complementares

Foram utilizadas as mesmas normas de referência e documentos complementares das análises de caracterização microestrutural dos materiais do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido.

4.15.2.2 Aparelhagem

Foi utilizada a mesma aparelhagem das análises de caracterização microestrutural dos materiais do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido.

4.15.2.3 Preparação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova para execução das análises foram obtidos a partir de materiais selecionados e destinados à fabricação dos componentes do dispositivo desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico, sendo cada material inspecionado dimensionalmente e visualmente quanto à sua integridade física, em formatos de chapa e cilíndrico, conforme

mostrado na Figura 95, sendo identificados conforme a Tabela 45, com suas respectivas dimensões.

Tabela 45 - Identificação dos corpos de prova utilizados nas análises de caracterização microestrutural dos materiais do dispositivo desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico

Nº Corpo de Prova	Especificação do Material	Formato da Amostra	Dimensões			
			Diâmetro (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Altura (mm)
AM-19	Aço AISI 420	Chapa	-	15	15	1
AM-20	Aço AISI 420	Cilindro	15	-	-	50

Fonte: O Autor (2020)

4.15.2.4 Procedimento

Foi utilizado o mesmo procedimento das análises de caracterização microestrutural dos materiais do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido.

4.15.3 Ensaio de Tração

4.15.3.1 Normas de Referência e Documentos Complementares

Foram utilizadas as mesmas normas de referência e documentos complementares dos ensaios de tração dos materiais do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido.

4.15.3.2 Aparelhagem

Foi utilizada a mesma aparelhagem dos ensaios de tração dos materiais do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido.

4.15.3.3 Preparação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova para execução dos ensaios foram obtidos a partir de materiais selecionados e destinados à fabricação dos componentes do dispositivo desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico, sendo cada material inspecionado dimensionalmente e

visualmente quanto à sua integridade física, em formatos de chapa e cilíndrico, conforme mostrado na Figura 31, sendo identificados conforme a Tabela 46, com suas respectivas dimensões.

Figura 31 - Separação dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração dos materiais do dispositivo desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico: (a) Amostras em formato de chapa; (b) Amostras em formato cilíndrico



(a)

(b)

Fonte: O Autor (2020)

Tabela 46 - Identificação dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração dos materiais do dispositivo desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico

Nº Corpo de Prova	Especificação do Material	Formato da Amostra	Dimensões			
			Diâmetro / Largura Total (mm)	Diâmetro / Largura Útil (mm)	Comprimento Total (mm)	Comprimento Útil (mm)
AM-21	Aço AISI 420	Chapa	20	12,5	200	87,5
AM-22	Aço AISI 420	Chapa	20	12,5	200	87,5
AM-23	Aço AISI 420	Chapa	20	12,5	200	87,5
AM-24	Aço AISI 420	Chapa	20	12,5	200	87,5
AM-25	Aço AISI 420	Cilindro	20	12,5	200	87,5
AM-26	Aço AISI 420	Cilindro	20	12,5	200	87,5
AM-27	Aço AISI 420	Cilindro	20	12,5	200	87,5
AM-28	Aço AISI 420	Cilindro	20	12,5	200	87,5

Fonte: O Autor (2020)

4.15.3.4 Procedimento

Foi utilizado o mesmo procedimento dos ensaios de tração dos materiais do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido.

4.15.4 Análises de Dureza

4.15.4.1 Normas de Referência e Documentos Complementares

Foram utilizadas as mesmas normas de referência e documentos complementares dos ensaios de dureza dos materiais do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido.

4.15.4.2 Aparelhagem

Foi utilizada a mesma aparelhagem dos ensaios de dureza dos materiais do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido.

4.15.4.3 Preparação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova para execução das análises foram a partir de materiais selecionados e destinados à fabricação dos componentes do dispositivo desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico, sendo cada material inspecionado dimensionalmente e visualmente quanto à sua integridade física, em formatos de chapa e cilíndrico, conforme mostrado na Figura 95, sendo identificados conforme a Tabela 47, com suas respectivas dimensões.

Tabela 47 - Identificação dos corpos de prova utilizados nos ensaios de dureza dos materiais do dispositivo desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico

Nº Corpo de Prova	Especificação do Material	Formato da Amostra	Dimensões			
			Diâmetro (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Altura (mm)
AM-29	Aço AISI 420	Chapa	-	30	30	1
AM-30	Aço AISI 420	Cilindro	15	-	-	30

Fonte: O Autor (2020)

4.15.4.4 Procedimento

Foi utilizado o mesmo procedimento dos ensaios de dureza do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido.

4.16 DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE TRATAMENTO TÉRMICO

O desenvolvimento do processo de tratamento térmico se deu a partir da necessidade da execução de operações de dobramento em componentes como a base e a haste de acionamento. Após várias tentativas de execução dessas operações, utilizando as respectivas matrizes de conformação, foi verificado que estes componentes apresentavam fissuras, trincas e outros tipos de falhas, em sua totalidade, associado a um alto nível de dureza. A Figura 32 mostra componentes que apresentaram falhas mecânicas após o processo de dobramento.

Figura 32 - Componentes que apresentaram falhas mecânicas após o processo de dobramento:
(a) Chapa da base do dispositivo antes do processo de dobramento;
(b) Chapa da base do dispositivo após o processo de dobramento



Fonte: O Autor (2020)

Com o uso do software Map Steel MUCG83[®], desenvolvido pelo Grupo de Transformações de Fases e Propriedades Complexas do Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da Universidade de Cambridge – Reino Unido, foi possível encontrar os valores da temperatura de início de transformação martensítica e da temperatura de início de transformação bainítica limitada ao crescimento, a partir da inserção dos teores percentuais de cada elemento químico do material, coletados a partir do certificado de qualidade número 10266, emitido por Empresa Fornecedora em 22/07/2019, mostrado na Figura 33, e com isso projetar um ponto de partida e uma faixa de temperatura necessária para aplicação do tratamento térmico.

De acordo com o certificado de qualidade fornecido, o material já havia passado por processos de têmpera e revenimento, mas sob condições e parâmetros de temperatura, tempos e métodos de resfriamentos não informados pela Empresa Fornecedora.

Com base nos resultados obtidos a partir do software Map Steel MUCG83[®], foram aplicadas à chapa sequências térmicas de recozimento, mostradas na Tabela 48, de forma a se obter durezas adequadas à execução do processo de dobramento do material, tendo em vista que este já havia sido temperado e revenido, porém apresentava altas durezas, as quais impediam a execução desse processo, ocasionando falhas nos componentes fabricados.

Tabela 48 - Sequência térmica de recozimento aplicada aos materiais em formato de chapa, utilizado para a fabricação do dispositivo desenvolvido

Sequência Térmica	Temperatura (°C)	Tempo de Aquecimento (minutos)	Forma de Resfriamento	Tempo de Resfriamento (minutos)
1	400	20	Forçado (ao ar)	10
2	400	20	Forçado (ao ar)	40
3	600	20	Forçado (ao ar)	20
4	700	20	Forçado (ao ar)	20
5	720	20	Forçado (ao ar)	20
6	850	20	Natural (dentro do forno)	480

Fonte: O Autor (2020)

4.16.1 Aplicação do Processo de Tratamento Térmico

A aplicação do processo de tratamento térmico se deu a partir de execuções de sequências térmicas de recozimento, mostradas na Tabela 48, tomando como ponto de partida a temperatura de início de transformação martensítica, obtida a partir do software Map Steel MUCG83[®].

4.16.1.1 Aparelhagem

A aparelhagem necessária à execução da aplicação do processo de tratamento térmico está listada na Tabela 49, juntamente com suas especificações técnicas.

Tabela 49 - Aparelhagem necessária à execução da aplicação do processo de tratamento térmico

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Forno de Tratamento Térmico Microprocessado	Pyro	Caltron	Rex-C900
Tijolos em material refratário	-	-	-

Fonte: O Autor (2020)

4.16.1.2 Procedimento

Inicialmente cada componente é inserido no forno de tratamento térmico microprocessado, sendo colocado sob a área dos tijolos em material refratário. O forno é fechado e ligado, sendo em seguida inserido o valor da temperatura desejada, por meio do microprocessador, até que a mesma seja atingida.

O componente é mantido no forno durante um tempo pré-determinado, ocorrendo em seguida do desligamento do mesmo. Após o desligamento do forno, cada componente é resfriado em sua região interna (resfriamento natural) ou fora do mesmo (resfriamento forçado a ar), de acordo com a metodologia empregada na sequência térmica adotada. Por fim, cada componente é inspecionado quanto à sua integridade estrutural e possíveis trincas e deformações.

4.16.2 Inspeção por Líquido Penetrante

Visando a identificação de possíveis trincas, amassamentos, fissuras e falhas na estrutura dos componentes do dispositivo desenvolvidos, foi realizado o ensaio não destrutivo de inspeção por líquido penetrante, em amostras aleatórias extraídas dos lotes produzidos.

4.16.2.1 Aparelhagem

A aparelhagem necessária à execução do ensaio não destrutivo de inspeção por líquido penetrante está listada na Tabela 50, juntamente com suas especificações técnicas.

Tabela 50 - Aparelhagem necessária à execução do ensaio não destrutivo de inspeção por líquido penetrante

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Líquido Penetrante Lavável a Água	Metal Chek	-	VP 30
Revelador Não Aquoso	Metal Chek	-	D 70

Fonte: O Autor (2020)

4.16.2.2 Procedimento

Inicialmente cada componente é submetido à aplicação do líquido penetrante, em todas as suas superfícies, até a secagem completa do mesmo (em torno de quinze minutos). Da mesma forma, em seguida é aplicado o revelador, sob o mesmo tempo de secagem, de forma a se observar possíveis trincas, amassamentos, fissuras e falhas. Caso haja, resíduos do líquido penetrante ficarão expostos na superfície dos componentes. Uma parte do revelador pode ser retirada da estrutura do componente, para fins de inspeção visual e verificação da eficácia do método.

4.17 ANÁLISES DE ESPECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS DO DISPOSITIVO DE EXTRAÇÃO DESENVOLVIDO COM APLICAÇÃO DO TRATAMENTO TÉRMICO

O objetivo destas análises é validar, com alto nível de exatidão e detalhe, as especificações técnicas dos materiais que irão compor os componentes do dispositivo de extração desenvolvido, já com a aplicação do tratamento térmico, pelo uso de ensaios destrutivos e não destrutivos, os quais provêm meios para a comprovação de seus elementos químicos e suas respectivas composições percentuais, verificação de micrografias e fases constantes, assim como a observância de comportamentos no que se diz respeito às suas resistências à perfuração e tração mecânica.

4.17.1 Análises de Espectrometria por Emissão Óptica

4.17.1.1 Normas de Referência e Documentos Complementares

Foram utilizadas as mesmas normas de referência e documentos complementares das análises de espectrometria por emissão óptica dos materiais do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico.

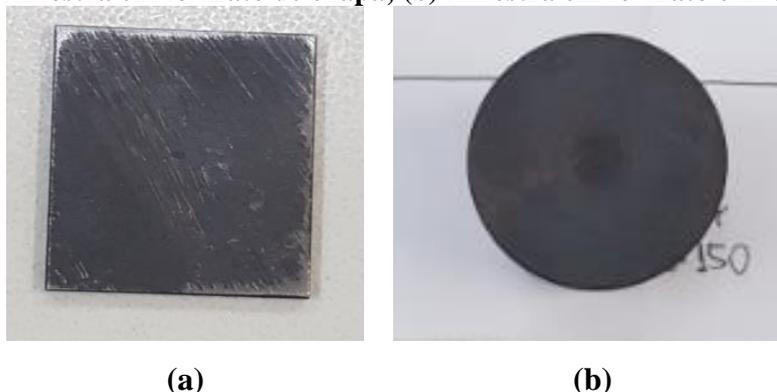
4.17.1.2 Aparelhagem

Foi utilizada mesma aparelhagem das análises de espectrometria por emissão óptica dos materiais do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico.

4.17.1.3 Preparação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova para execução das análises foram obtidos a partir de materiais selecionados e destinados à fabricação dos componentes do dispositivo desenvolvido, com a aplicação do tratamento térmico, sendo cada material inspecionado dimensionalmente e visualmente quanto à sua integridade física, em formatos de chapa e cilíndrico, conforme mostrado na Figura 35, sendo identificados conforme a Tabela 51, com suas respectivas dimensões.

Figura 35 - Separação dos corpos de prova utilizados nas análises de espectrometria por emissão óptica dos materiais do dispositivo desenvolvido, com aplicação do tratamento térmico:
(a) Amostra em formato de chapa; (b) Amostra em formato cilíndrico



Fonte: O Autor (2020)

Tabela 51 - Identificação dos corpos de prova utilizados nas análises de espectrometria por emissão óptica dos materiais do dispositivo desenvolvido, com aplicação do tratamento térmico

Nº Corpo de Prova	Especificação do Material	Formato da Amostra	Dimensões			
			Diâmetro (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Altura (mm)
AM-31	Aço AISI 420	Chapa	-	100	100	1
AM-32	Aço AISI 420	Cilindro	40	-	-	100

Fonte: O Autor (2020)

4.17.1.4 Procedimento

Foi utilizado o mesmo procedimento das análises de espectrometria por emissão óptica dos materiais do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico.

4.17.2 Caracterização Microestrutural

4.17.2.1 Normas de Referência e Documentos Complementares

Foram utilizadas as mesmas normas de referência e documentos complementares das análises de caracterização microestrutural dos materiais do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico.

4.17.2.2 Aparelhagem

Foi utilizada mesma aparelhagem das análises de caracterização microestrutural dos materiais do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico.

4.17.2.3 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova para execução das análises foram obtidos a partir de materiais selecionados e destinados à fabricação dos componentes do dispositivo desenvolvido, com a aplicação do tratamento térmico, sendo cada material inspecionado dimensionalmente e visualmente quanto à sua integridade física, em formatos de chapa e cilíndrico, conforme mostrado na Figura 104, sendo identificados conforme a Tabela 52, com suas respectivas dimensões.

Tabela 52 - Identificação dos corpos de prova utilizados nas análises de caracterização microestrutural dos materiais do dispositivo desenvolvido, com aplicação do tratamento térmico

Nº Corpo de Prova	Especificação do Material	Formato da Amostra	Dimensões			
			Diâmetro (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Altura (mm)
AM-33	Aço AISI 420	Chapa	-	15	15	1
AM-34	Aço AISI 420	Cilindro	15	-	-	50

Fonte: O Autor (2020)

4.17.2.4 Procedimento

Foi utilizado o mesmo procedimento das análises de caracterização microestrutural dos materiais do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico.

4.17.3 Ensaio de Tração

4.17.3.1 Normas de Referência e Documentos Complementares

Foram utilizadas as mesmas normas de referência e documentos complementares dos ensaios de tração dos materiais do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico.

4.17.3.2 Aparelhagem

Foi utilizada mesma aparelhagem dos ensaios de tração do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico.

4.17.3.3 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova para execução dos ensaios foram obtidos a partir de materiais selecionados e destinados à fabricação dos componentes do dispositivo desenvolvido, com a aplicação do tratamento térmico, sendo cada material inspecionado dimensionalmente e visualmente quanto à sua integridade física, em formatos de chapa e cilíndrico, conforme mostrado na Figura 36, sendo identificados conforme a Tabela 53, com suas respectivas dimensões.

Figura 36 - Separação dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração dos materiais do dispositivo desenvolvido, com a aplicação do tratamento térmico:

(a) Amostras em formato de chapa; (b) Amostras em formato cilíndrico



(a)



(b)

Fonte: O Autor (2020)

Tabela 53 - Identificação dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração dos materiais do dispositivo desenvolvido, com a aplicação do tratamento térmico

Nº Corpo de Prova	Especificação do Material	Formato da Amostra	Dimensões			
			Diâmetro / Largura Total (mm)	Diâmetro / Largura Útil (mm)	Comprimento Total (mm)	Comprimento Útil (mm)
AM-35	Aço AISI 420	Chapa	20	12,5	200	87,5
AM-36	Aço AISI 420	Chapa	20	12,5	200	87,5
AM-37	Aço AISI 420	Chapa	20	12,5	200	87,5
AM-38	Aço AISI 420	Chapa	20	12,5	200	87,5
AM-39	Aço AISI 420	Cilindro	20	12,5	200	87,5
AM-40	Aço AISI 420	Cilindro	20	12,5	200	87,5
AM-41	Aço AISI 420	Cilindro	20	12,5	200	87,5
AM-42	Aço AISI 420	Cilindro	20	12,5	200	87,5

Fonte: O Autor (2020)

4.17.3.4 Procedimento

Foi utilizado o mesmo procedimento dos ensaios de tração dos materiais do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico.

4.17.4 Análises de Dureza

4.17.4.1 Normas de Referência e Documentos Complementares

Foram utilizadas as mesmas normas de referência e documentos complementares dos ensaios de dureza do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico.

4.17.4.2 Aparelhagem

Foi utilizada a mesma aparelhagem dos ensaios de dureza dos materiais do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico.

4.17.4.3 Preparação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova para execução das análises foram a partir de materiais selecionados e destinados à fabricação dos componentes do dispositivo desenvolvido, com a aplicação do tratamento térmico, sendo cada material inspecionado dimensionalmente e visualmente quanto à sua integridade física, em formatos de chapa e cilíndrico, conforme mostrado na Figura 104, sendo identificados conforme a Tabela 54, com suas respectivas dimensões.

Tabela 54 - Identificação dos corpos de prova utilizados nos ensaios de dureza dos materiais do dispositivo desenvolvido, com a aplicação do tratamento térmico

Nº Corpo de Prova	Especificação do Material	Formato da Amostra	Dimensões			
			Diâmetro (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Altura (mm)
AM-43	Aço AISI 420	Chapa	-	30	30	1
AM-44	Aço AISI 420	Cilindro	15	-	-	30

Fonte: O Autor (2020)

4.17.4.4 Procedimento

Foi utilizado o mesmo procedimento dos ensaios de dureza do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico.

4.18 METODOLOGIA DO PROJETO DE ENGENHARIA REVERSA DO DISPOSITIVO DESENVOLVIDO

Durante o início do processo de fabricação dos protótipos foram verificados que inúmeras cotas estavam com os valores equivocados. Diante disso, todas as cotas foram reinspeccionadas, sendo geradas novas fichas técnicas, com maior nível de detalhe, maior precisão e confiabilidade quanto aos valores das cotas. Foram confeccionadas um total de dezesseis fichas técnicas, com as suas respectivas nomenclaturas listadas na Tabela 55.

Tabela 55 - Nomenclaturas das fichas técnicas de dispositivo desenvolvido, elaboradas a partir das reinspeções de cotas constantes nos dispositivos (Autor, 2020)

Seqüência do Elemento	Nomenclatura
1	Empurrador de Picolé
2	Base
3	Extrator Montagem
4	Extrator - P1
5	Extrator - P2
6	Inserto
7	Haste de Acionamento
8	Haste de Transmissão
9	Eixo do Extrator
10	Pino de Fixação da Estrutura
11	Mola de Compressão
12	Arruela Lisa do Pino
13	Anilha Aberta
14	Arruela Lisa do Eixo
15	Cupilha
16	Mola de Tração

Fonte: O Autor (2020)

4.19 PLANO SISTÊMICO DE EXECUÇÃO DAS ANÁLISES ESTRUTURAIS DO DISPOSITIVO DESENVOLVIDO

Em virtude da comprovação da eficácia do plano sistêmico de execução das análises estruturais aplicado ao dispositivo original, foi aplicado o mesmo processo para o novo dispositivo em sua versão final, no tocante aos seus componentes críticos.

4.19.1 Análise Estrutural do Conjunto Extrator do Dispositivo Desenvolvido

A análise estrutural do conjunto extrator do dispositivo desenvolvido seguiu a mesma lógica e parâmetros de discretização de malha utilizados nas análises empregadas para o dispositivo original. As métricas de malha utilizadas na análise estrutural do conjunto extrator do dispositivo desenvolvido são mostrados na Tabela 56.

Tabela 56 - Métricas de malha utilizadas na análise estrutural do conjunto extrator do dispositivo desenvolvido

Indicadores métricos	Skewness	Orthogonal Quality
Mínimo	0,000016	-
Máximo	-	1
Médio	0,303	0,805
Desvio padrão	0,270	0,297
Valor Ótimo (média)	0 – 0,5	0,6 - 1

Fonte: O Autor (2020)

Observando percentualmente as variações da qualidade da malha, foi analisada a convergência da solução através do refinamento da malha nas regiões de maior gradiente de tensão no componente, aumentando-se a quantidade de nós e elementos em certa em 60%, acarretando em variações de tensões girando em torno de 3,8%. Por fim, foi obtida uma malha com 226157 nós e 56719 elementos, sendo cada um destes com 0,45 milímetros de tamanho.

As demais condições de contorno da mola, sendo uma a existência de um suporte fixo (fixando uma extremidade da mola) e a outra a existência de um deslocamento da mola (valor obtido na simulação do conjunto extrator, através da rotação de 30 graus que fora verificada, tendo como consequência a extensão a mola, juntamente com a deformação inicial medida em campo).

4.19.2 Redimensionamento da Haste de Acionamento do Dispositivo Original

Observando as análises estruturais realizadas nos componentes do dispositivo original, veremos que é possível constatar que duas delas são mais críticas, sendo uma referente à haste de acionamento e a outra referente à pastilha. As análises referentes aos outros três componentes casos não apresentaram nenhum indicativo de causa de falha mecânica.

Um bom indicativo dos resultados destas análises é que de fato estes fenômenos são observados na prática, ou seja, todas as falhas apresentadas nos dispositivos originais foram observadas ou na pastilha ou na haste de acionamento.

A maioria das falhas ocorrem devido ao desgaste da pastilha, mas uma vez que este problema seja solucionado, é esperado que as falhas na haste de acionamento aumentem.

Portanto, o ideal é que sejam solucionados ambos os problemas de uma vez, de forma que a vida útil do dispositivo desenvolvido aumente significativamente, em relação à vida útil do dispositivo original.

No caso da haste de acionamento, restam três possíveis soluções para reduzir o nível de tensões em sua estrutura, sendo a primeira modificar o material e manter a geometria do componente, a segunda modificar a geometria do componente, mantendo o material original, e a terceira modificar o funcionamento de todo o dispositivo (realizando alterações estruturais ou mesmo no princípio de funcionamento do equipamento, por exemplo).

Do ponto de vista industrial, é muito mais vantajoso que seja alterado o material ou a geometria do dispositivo, em detrimento da mudança estrutural ou no funcionamento do equipamento, sendo levadas em consideração inicialmente as duas primeiras opções.

Visando a possível mudança na geometria do dispositivo, duas soluções foram propostas, sendo uma realizar o aumento do diâmetro da haste de acionamento e a outra utilizar uma camada externa de outro material mais resistente ao impacto (como um polímero, por exemplo). Contudo, a última opção possui diversas ressalvas, principalmente devido à possibilidade de contaminação que o material pode causar no produto, quando da sua extração do molde, pelo dispositivo.

A escolha da primeira opção parecia óbvia, todavia o aumento do diâmetro da haste de acionamento causaria um aumento aproximado de vinte e cinco gramas em cada dispositivo, o que ocasionaria um aumento de cerca de vinte e cinco quilogramas no equipamento, podendo assim sobrecarregar o conjunto de servo motores acionadores das barras extratoras, os quais são responsáveis por toda a movimentação dos dispositivos e com isso causar danos irreversíveis ao funcionamento destes equipamentos.

Portanto, uma terceira solução foi proposta, sendo essa alterar o raio de curvatura da haste de acionamento, de forma a eliminar pontos de acúmulo de tensão em sua estrutura. Essa solução não dificulta a fabricação da haste de acionamento, não traz nenhum esforço maior aos servo motores, assim como nenhum aumento de risco de contaminação, sendo assim a solução mais eficiente.

Para obter o melhor resultado para o raio de curvatura, foram realizadas análises em tempo real, enquanto esse raio era modificado. Este método foi possível de ser realizado através do uso do software ANSYS Discovery Live[®], uma nova plataforma da ANSYS[®] que utiliza o processamento da placa de vídeo do computador para obter os resultados confiáveis e com maior velocidade.

Após atingir um valor considerado ótimo, levando-se em conta também a facilidade da fabricação, a melhor geometria encontrada foi analisada posteriormente no software ANSYS Mechanical[®], uma vez que ele foi utilizado para todas as análises estruturais, sendo assim uma medida complementar de verificação na haste de acionamento redimensionada.

Diante dos dados obtidos, novamente foi realizada a discretização do componente, gerando a malha de elementos finitos. As métricas de malha utilizadas na análise estrutural da haste de acionamento do dispositivo desenvolvido são mostrados na Tabela 57.

Tabela 57 - Métricas de malha utilizadas na análise estrutural da haste de acionamento redimensionada do dispositivo desenvolvido (Autor, 2020)

Indicadores métricos	Skewness	Orthogonal Quality
Mínimo	0.000086	-
Máximo	-	0.991
Médio	0.2275	0.7708
Desvio padrão	0.1214	0.1191
Valor Ótimo (média)	0 – 0.3	0.6 – 1

Fonte: O Autor (2020)

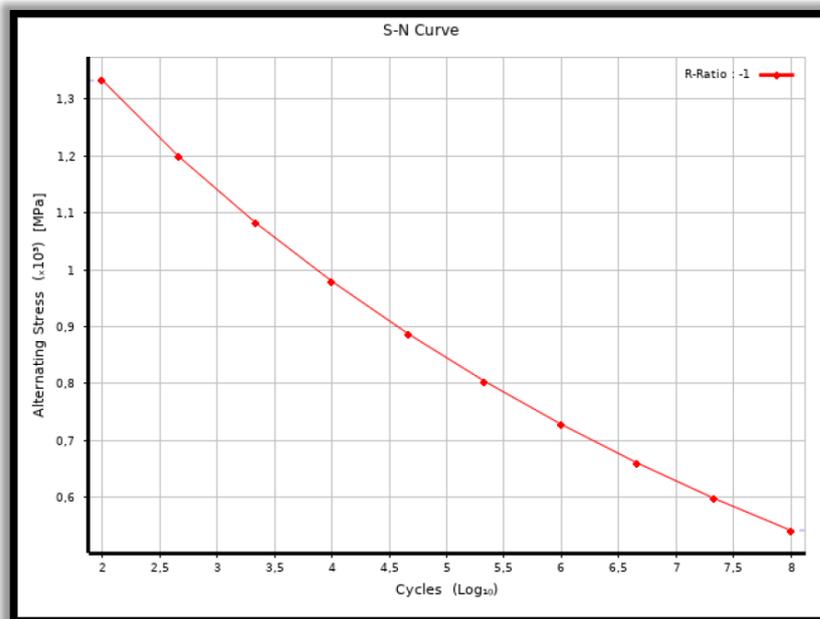
Os critérios de convergência foram os mesmos utilizados na análise estrutural da haste de acionamento do dispositivo desenvolvido, antes do dimensionamento, uma vez que este é um dos componentes mais críticos do dispositivo.

Nesta oportunidade, foi realizada uma verificação em dois tempos, aumentando inicialmente 80 %, e na segunda iteração cerca de 60 %. Ambas resultaram em uma alteração significativamente baixa no gradiente de tensões (alterando o valor da tensão máxima em 1.2%), bem abaixo do critério de 5% estabelecido nas análises estruturais iniciais).

4.19.3 Análise Estrutural da Haste de Acionamento do Dispositivo Desenvolvido

Com base no mesmo método utilizado na análise estrutural da haste de acionamento do dispositivo original, mencionado anteriormente, foi obtida a curva de estimativa de tempo de vida útil em termos de ciclos de tensão alternada para o material do componente (curva “S-N”). A curva “S-N” do novo material empregado (Aço Inoxidável AISI 420) é mostrada na Figura 37 (NAS, 2013).

Figura 37 - Curva de estimativa de tempo de vida útil em termos de ciclos de tensão alternada para o material da haste de acionamento do dispositivo desenvolvido



Fonte: NAS (2013)

A partir dos dados listados na Figura 110 é possível observar pelo gráfico que a “*tensão para vida infinita*”, ou seja, o limite de tensão para que o material não sofra os efeitos de fadiga, se encontra próximo dos 540 megapascals. Portanto, é desejável que o material não sofra nenhum esforço acima deste valor, caso se deseje evitar a fadiga do mesmo.

Entretanto, especificamente para a análise estrutural desse componente, por se tratar de um material no qual é empregado tratamento térmico, é necessário que sejam levados em consideração novos parâmetros, não empregados na análise estrutural da haste de acionamento do dispositivo original. Para tal, foi considerada a faixa de dureza do material em torno de 40 Rockwell C (HRC), obtida a partir de um revenimento realizado em torno de 550 °C (ASKELAND, 2011).

De posse dessas informações, foi realizada uma consulta junto ao banco de dados MatWeb®, o qual dispõe das propriedades do material para diversas temperaturas de revenimento. A temperatura de revenimento que mais se aproximou das condições esperadas e solicitadas para as simulações do projeto foi 540 °C, sendo as seguintes propriedades adotadas:

- Densidade = 7,8 g/cm³
- Limite de Resistência à Tração = 660 MPa
- Tensão de Escoamento = 585 MPa
- Módulo de Elasticidade = 200 GPa
- Coeficiente de Poisson = 0,24

É importante mencionar que a maior causa da falha por fadiga é causada pela geometria e pela fabricação, sendo o material apenas um dos fatores (NORTON, 2013). O software utilizado para as análises já realiza a transformação necessária para considerar os efeitos de geometria, mas não os efeitos de fabricação. Desta forma, esta análise se baseia no fato de que a fabricação foi feita da forma adequada. Foram utilizados as mesmas teorias e modelos matemáticos, memoriais de cálculo, parâmetros e condições de contorno da análise estrutural da haste de acionamento do dispositivo original. Novamente, para realizar a análise estrutural do componente, foi optado por utilizar a métrica no modelo numérico de elementos finitos (a malha). Dessa forma, foram realizadas duas análises, sendo uma considerando o raio de curvatura original (6,73 milímetros) e a outra considerando o raio de curvatura modificado (32,96 milímetros), conforme mostrado na análise de redimensionamento da haste de acionamento. As métricas de malha utilizadas na análise estrutural da haste de acionamento do dispositivo desenvolvido, considerando o raio de curvatura original, são mostrados na Tabela 58.

Tabela 58 - Métricas de malha utilizadas na análise estrutural da haste de acionamento do dispositivo desenvolvido, considerando o raio de curvatura original

Indicadores métricos	Skewness	Orthogonal Quality
Mínimo	0,0030243	-
Máximo	-	0,98651
Médio	0,239	0,758
Desvio padrão	0,134	0,132
Valor Ótimo (média)	0 - 0.5	0.6 - 1

Fonte: O Autor (2020)

Neste caso foi realizado uma verificação observando percentualmente as variações da qualidade da malha, analisando assim a convergência da solução através do refinamento da malha nas regiões de maior gradiente de tensão no componente e aumentando a quantidade de nós e elementos em certa em 66,6%, acarretando em variações de tensões em torno de 2,42%. As métricas de malha utilizadas na análise estrutural da haste de acionamento do dispositivo desenvolvido, considerando o raio de curvatura redimensionado, são mostrados na Tabela 59.

Tabela 59 - Métricas de malha utilizadas na análise estrutural da haste de acionamento do dispositivo desenvolvido, considerando o raio de curvatura modificado

Indicadores métricos	Skewness	Orthogonal Quality
Mínimo	0,0002347	-
Máximo	-	0,98995
Médio	0,215	0,783
Desvio padrão	0,122	0,120
Valor Ótimo (média)	0 - 0.5	0.6 - 1

Fonte: O Autor (2020)

O critério de convergência de malha foi mais rigoroso, devido a importância dos resultados. Neste caso, analisando a convergência da solução através do refinamento da malha nas regiões de maior gradiente de tensão no componente e aumentando a quantidade de nós e elementos em certa em 807,00%, acarretando em variações de tensões em torno de 3,17%.

4.19.4 Análise Estrutural da Mola Principal do Dispositivo Desenvolvido

A análise estrutural da mola principal do dispositivo desenvolvido foi realizada também utilizando a condição de simetria, conforme já havia sido feito na análise da mola principal do dispositivo original, para simplificação do modelo. Tal consideração não gera nenhuma perda de informação, pois o problema físico em si é simétrico (tanto geometricamente quanto nos esforços).

Tendo em vista que a mola principal não sofre fadiga devido aos esforços naturais de seu funcionamento e que os casos onde este limite pode ser ultrapassado (velocidade ligeiramente maior, menor área de contato, entre outros) ocorrem com baixa frequência, foi adotada a implementação de uma mola em aço inoxidável tipo 302 (comercial), a qual possui tensão de ruptura de 202 quilograma-força por centímetro quadrado (kgf/cm^2), equivalente a

1981 megapascals, de acordo com os dados extraídos do certificado do produto número 038861, emitido por Empresa Fornecedora, em 13/12/2019.

Como não foi disponibilizado pela Empresa Fornecedora o valor da tensão de escoamento, foi avaliado o fato de que com o tratamento de têmpera o material tende a se tornar frágil e sua tensão de escoamento (S_y) se aproxima da tensão de ruptura (S_r). Foi avaliada a tendência da razão (S_y/S_r) para os estados encontrados. Foi adotado, portanto, com base na tendência observada, o valor da tensão de escoamento como sendo 70% do valor da tensão de ruptura, o que corresponde a aproximadamente 1.387 megapascals.

As métricas de malha utilizadas na análise estrutural da mola principal do dispositivo desenvolvido são mostrados na Tabela 60.

Tabela 60 - Métricas de malha utilizadas na análise estrutural da mola principal do dispositivo desenvolvido (Autor, 2020)

Indicadores métricos	Skewness	Orthogonal Quality
Mínimo	0,083082	-
Máximo	-	0,9932
Médio	0.265	0.942
Desvio padrão	0.098	0.051
Valor Ótimo (média)	0 – 0.5	0.6 – 1

Fonte: O Autor (2020)

Observando percentualmente as variações da qualidade da malha, foi analisada a convergência da solução através do refinamento da malha nas regiões de maior gradiente de tensão no componente. Com isso, um aumento de cerca de 27,95 % na quantidade de nós e de elementos resultou numa variação em torno de 1,83% no valor de tensão máxima da estrutura.

4.19.5 Análise Estrutural da Pastilha do Dispositivo Desenvolvido

Uma vez que a geometria do dispositivo foi alterada, é sempre necessário verificar que as frequências naturais do sistema resultante não estão próximas das frequências que atuam no equipamento. Dessa forma, utilizando o software ANSYS Discovery Live[®], foi possível obter as três primeiras frequências naturais do sistema, onde geralmente as duas primeiras são mais importantes para este tipo de verificação. Geralmente, é desejável que a frequência de vibração

do equipamento seja dez vezes menor que a primeira frequência natural dos componentes, sendo o limite mínimo recomendado é de três vezes menor (NORTON, 2013). Como o ANSYS Discovery Live® não utiliza um método onde é possível controlar a discretização da peça, não é possível verificar com exatidão a qualidade dela. Portanto, é recomendado cautela e uma maior margem de segurança quando considerados estes valores.

Foram utilizados os mesmos métodos, parâmetros e equações quando da análise da pastilha do dispositivo original, também atentando aos conceitos de tribologia, afim de se obter uma estimativa acerca do número de ciclos para os materiais, sendo mais uma vez necessária a análise do desgaste superficial (por abrasão) desse componente.

4.19.6 Análise Estrutural da Base do Dispositivo Desenvolvido

Visando a análise estrutural da base do dispositivo desenvolvido, foram utilizadas novamente as informações disponibilizadas banco de dados MatWeb®, nos mesmos moldes da análise realizada para a haste de acionamento do dispositivo desenvolvido. Sendo assim, as informações utilizadas para a realização das simulações foram:

- Densidade = $7,8 \text{ kg/m}^3$
- Limite de Resistência à Tração = 660 MPa
- Tensão de Escoamento = 585 MPa
- Módulo de Elasticidade = 200 MPa
- Coeficiente de Poisson = 0,24

Diante destes dados, foi possível utilizar os mesmos dados da Curva “*S-N*” utilizada na análise realizada para a haste de acionamento do dispositivo desenvolvido, mostrada na Figura 37, sendo também possível observar pelo gráfico que a “*tensão para vida infinita*”, ou seja, o limite de tensão para que o material não sofra os efeitos de fadiga, se encontra próximo dos 540 megapascals. Portanto, é desejável que o material não sofra nenhum esforço acima deste valor, caso se deseje evitar a fadiga do mesmo.

Seguindo o mesmo padrão das análises anteriores em relação à qualidade da malha, foram realizados os estudos da malha deste componente assegurando-se os parâmetros

“*Skewness*” e “*Orthogonal Quality*”. As métricas de malha utilizadas na análise estrutural da base do dispositivo desenvolvido são os mesmos utilizados na análise estrutural da base do dispositivo original, já mostrados na Tabela 27. Observando percentualmente as variações da qualidade da malha, foi analisada a convergência da solução através do refinamento da malha nas regiões de maior gradiente de tensão no componente. Com isso, um aumento de cerca de 61,6 % na quantidade de nós e de elementos resultou numa variação em torno de 5,3 % no valor de tensão máximo da estrutura.

4.20 DESENVOLVIMENTO DO NOVO DISPOSITIVO

Após o desenvolvimento e testes em campo dos protótipos, e com base no aperfeiçoamento e validação dos métodos e processos utilizados, foi iniciada a fabricação do novo dispositivo, desenvolvido em larga escala, sendo realizado em paralelo o desenvolvimento das matrizes de conformação mecânica e o respectivo processo de tratamento térmico. Todos os componentes foram desenvolvidos com base nas dimensões e perfis obtidos a partir das fichas técnicas geradas por meio da metodologia de engenharia reversa, bem como das análises estruturais baseadas no método dos elementos finitos, quando aplicadas.

4.20.1 Desenvolvimento da Base

Visando o desenvolvimento da base do novo dispositivo em sua versão final, foi necessária a utilização dos processos de manufatura assistida por computador (CAM) e corte a laser, de forma a garantir a confiabilidade dimensional e acabamento final do componente. O processo CAM também foi utilizado na confecção das matrizes de conformação mecânica necessárias às execuções dos processos de fixação, dobramento e abaulamento envolvidos, descritas na Tabela 61.

Tabela 61 - Especificação das matrizes de conformação mecânica necessárias às execuções dos processos de fixação, dobramento e abaulamento envolvidos no desenvolvimento da base do novo dispositivo em sua versão final

Ordem	Especificação	Finalidade
1	Matriz de Dobramento	Execução do dobramento da chapa
2	Matriz de Fixação	Suporte e fixação do processo de dobramento da chapa
3	Matriz de Abaulamento	Execução do perfil abaulado da ponta do dispositivo

Fonte: O Autor (2020)

Todos os desenhos foram elaborados na plataforma CAD Solidworks® versão 2013 SP3.0, sendo processados posteriormente na plataforma CAM EdgeCAM® versão 2011 R2, quando da fabricação das matrizes de conformação mecânica e na plataforma CAM Smart Manager®, quando da execução do corte a laser da chapa bruta, onde foram gerados os respectivos códigos em CNC para posterior alimentação nos equipamentos controlados por este tipo de sistema.

4.20.2 Desenvolvimento da Haste de Acionamento

Visando o desenvolvimento da haste de acionamento do novo dispositivo em sua versão final, foi necessária a utilização de processos de usinagem convencional. Estes processos foram também utilizados na confecção das matrizes de conformação mecânica necessárias às execuções dos processos de corte, fixação, dobramento, furação e brasagem envolvidos, descritos na Tabela 62.

Tabela 62 - Especificação das matrizes de conformação mecânica necessárias às execuções dos processos de corte, fixação, dobramento, furação e brasagem envolvidos no desenvolvimento da haste de acionamento do novo dispositivo em sua versão final

Ordem	Especificação	Finalidade
1	Matriz de Fixação	Fixação e posicionamento da arame principal da haste
2	Matriz de Dobramento	Execução do dobramento do arame principal da haste
3	Matriz de Posicionamento	Fixação e posicionamento da haste dobrada e pino articulado
4	Matriz de Conexão	Posicionamento e conexão da haste de articulação

Fonte: O Autor (2020)

4.20.3 Desenvolvimento do Conjunto Extrator

Visando o desenvolvimento do conjunto extrator do novo dispositivo em sua versão final, foi necessária a utilização de processos de usinagem convencional, assim como processo de soldagem por brasagem. Estes processos foram também utilizados na confecção das matrizes de conformação mecânica necessárias às execuções dos processos de dobramento e brasagem envolvidos, descritos na Tabela 63.

Tabela 63 - Especificação da matriz de conformação mecânica necessária às execuções dos processos de dobramento e brasagem envolvidos no desenvolvimento do conjunto extrator do novo dispositivo em sua versão final (Autor, 2020)

Ordem	Especificação	Finalidade
1	Matriz de Dobramento	Execução do dobramento da chapa de articulação do conjunto
2	Matriz de Fixação	Fixação e posicionamento da cabeça e chapa de articulação
3	Matriz de Posicionamento	Fixação e posicionamento da cabeça e pastilha

Fonte: O Autor (2020)

4.20.4 Desenvolvimento do Eixo do Conjunto Extrator

Visando o desenvolvimento do eixo do conjunto extrator do novo dispositivo em sua versão final, foi necessária a utilização dos mesmos processos de usinagem empregados no desenvolvimento do protótipo, não sendo necessária a confecção de matrizes de conformação mecânica destinadas às execuções do processo.

4.20.5 Desenvolvimento dos Pinos de Fixação da Estrutura

Visando o desenvolvimento dos pinos de fixação da estrutura do novo dispositivo em sua versão final, foi necessária a utilização dos mesmos processos de usinagem empregados no desenvolvimento do protótipo, não sendo necessária a confecção de matrizes de conformação mecânica destinadas às execuções do processo.

4.20.6 Desenvolvimento da Haste de Transmissão

Visando o desenvolvimento da haste de transmissão do novo dispositivo em sua versão final, foi necessária a utilização de processo de corte e dobramento. Os processos utilizados na confecção da matriz de conformação mecânica necessária às execuções destes processos envolvidos, descritos na Tabela 64, foram usinagem convencional e soldagem.

Tabela 64 - Especificação da matriz de conformação mecânica necessária às execuções dos processos de corte e dobramento envolvidos no desenvolvimento da haste de transmissão do novo dispositivo em sua versão final

Ordem	Especificação	Finalidade
1	Matriz de Posicionamento e Dobramento	Posicionamento e dobramento do arame cortado

Fonte: O Autor (2020)

4.20.7 Desenvolvimento das Matrizes de Conformação Mecânica

Com o auxílio do um software CAD Autodesk Inventor 2019[®], foi realizado o projeto e modelagem das partes componentes de todas as matrizes de conformação mecânica necessárias às execuções dos processos, quando do desenvolvimento dos componentes do novo dispositivo em sua versão final. Todos os materiais empregados nas respectivas fabricações e todas as dimensões das mesmas estão indicadas em fichas técnicas.

4.20.7.1 Matrizes de Conformação Mecânica da Base

4.20.7.1.1 Matriz de Dobramento

A matriz de conformação mecânica necessária à execução do dobramento da chapa da base foi desenvolvida com base em um total de sete elementos, onde suas respectivas nomenclaturas estão listadas na Tabela 65.

Tabela 65 - Nomenclaturas dos elementos componentes da matriz de conformação mecânica necessária à execução do dobramento da chapa da base

Seqüência do Elemento	Nomenclatura
1	Dispositivo de Dobra da Base
2	Base do Dispositivo
3	Placa do Dispositivo
4	Punção
5	Punção da Aba da Mola
6	Espiga
7	Pino Posicionador

Fonte: O Autor (2020)

4.20.7.1.2 Matriz de Fixação

A matriz de conformação mecânica necessária à execução do suporte e fixação do processo de dobramento da chapa da base foi desenvolvida com base em um total de nove elementos, onde suas respectivas nomenclaturas estão listadas na Tabela 66.

Tabela 66 - Nomenclaturas dos elementos componentes da matriz de conformação mecânica necessária à execução do suporte e fixação do processo de dobramento da chapa da base

Sequência do Elemento	Nomenclatura
1	Dispositivo de Repuxo da Base
2	Base Fixa
3	Placa Móvel
4	Espiga
5	Punção
6	Pino Guia
7	Pino de Posição
8	Bucha do Dispositivo
9	Contrachapa do Produto

Fonte: O Autor (2020)

4.20.7.1.3 Matriz de Abaulamento

A matriz de conformação mecânica necessária à execução do perfil abaulado da ponta da base foi desenvolvida com base em um total de treze elementos, onde suas respectivas nomenclaturas estão listadas na Tabela 67.

Tabela 67 - Nomenclaturas dos elementos componentes da matriz de conformação mecânica necessária à execução do perfil abaulado da ponta da base

Sequência do Elemento	Nomenclatura
1	Dispositivo de Abertura da Base do Dispositivo
2	Dispositivo de Abertura do Dispositivo
3	Chapa Base - Horizontal
4	Chapa Base - Vertical
5	Posicionador Inferior
6	Contrachapa Apoio Inferior
7	Suporte Mão Francesa
8	Contrachapa Traseira
9	Posicionador Central
10	Case Externo
11	Punção Interno
12	Espiga do Punção
13	Pino de Engate

Fonte: O Autor (2020)

4.20.7.2 Matrizes de Conformação Mecânica da Haste de Acionamento

4.20.7.2.1 Matriz de Fixação

A matriz de conformação mecânica necessária à execução da fixação e posicionamento da arame principal da haste de acionamento foi desenvolvida com base em um total de três elementos, onde suas respectivas nomenclaturas estão listadas na Tabela 68.

Tabela 68 - Nomenclaturas dos elementos componentes da matriz de conformação mecânica necessária à execução da fixação e posicionamento da arame principal da haste de acionamento

Sequência do Elemento	Nomenclatura
1	Dispositivo de Furação da Haste de Acionamento
2	Chapa Base
3	Contrachapa

Fonte: O Autor (2020)

4.20.7.2.2 Matriz de Dobramento

A matriz de conformação mecânica necessária à execução do dobramento do arame principal da haste de acionamento foi desenvolvida com base em um total de cinco elementos, onde suas respectivas nomenclaturas estão listadas na Tabela 69.

Tabela 69 - Nomenclaturas dos elementos componentes da matriz de conformação mecânica necessária à execução do dobramento do arame principal da haste de acionamento

Sequência do Elemento	Nomenclatura
1	Dispositivo de Dobra da Haste de Acionamento
2	Base do Dispositivo
3	Manípulo de Dobra
4	Contrachapa do Dispositivo
5	Pino do Rolamento

Fonte: O Autor (2020)

4.20.7.2.3 Matriz de Posicionamento

A matriz de conformação mecânica necessária à fixação e posicionamento da haste de acionamento dobrada e seu pino articulado foi desenvolvida com base em um total de seis elementos, onde suas respectivas nomenclaturas estão listadas na Tabela 70.

Tabela 70 - Nomenclaturas dos elementos componentes da matriz de conformação mecânica necessária à fixação e posicionamento da haste de acionamento dobrada e seu pino articulado

Sequência do Elemento	Nomenclatura
1	Dispositivo de Solda da Haste de Acionamento
2	Chapa Base
3	Chapa de Suporte do Grampo A
4	Chapa de Suporte do Grampo B
5	Pino Guia
6	Suporte do Pino

Fonte: O Autor (2020)

4.20.7.2.4 Matriz de Conexão

A matriz de conformação mecânica necessária ao posicionamento e conexão da haste de articulação à haste de acionamento foi desenvolvida com base em um total de três elementos, onde suas respectivas nomenclaturas estão listadas na Tabela 71.

Tabela 71 - Nomenclaturas dos elementos componentes da matriz de conformação mecânica necessária ao posicionamento e conexão da haste de articulação

Sequência do Elemento	Nomenclatura
1	Dispositivo de Furação da Haste de Articulação
2	Camisa do Pino
3	Stop do Pino

Fonte: O Autor (2020)

4.20.7.3 Matrizes de Conformação Mecânica do Conjunto Extrator

4.20.7.3.1 Matriz de Dobramento

A matriz de conformação mecânica necessária à execução do dobramento da chapa de articulação do conjunto extrator foi desenvolvida com base em um total de seis elementos, onde suas respectivas nomenclaturas estão listadas na Tabela 72.

Tabela 72 - Nomenclaturas dos elementos componentes da matriz de conformação mecânica necessária à execução do dobramento da chapa de articulação do conjunto extrator

Sequência do Elemento	Nomenclatura
1	Dispositivo de Dobra da Aba do Extrator
2	Base do Dispositivo
3	Coluna do Dispositivo
4	Placa Superior
5	Punção
6	Espiga do Punção

Fonte: O Autor (2020)

4.20.7.3.2 Matrizes de Fixação e Posicionamento

As matrizes de conformação mecânica necessárias à execução da fixação e posicionamento da cabeça e chapa de articulação e fixação e posicionamento da cabeça e pastilha do conjunto extrator foram desenvolvidas com base em um total de seis elementos, onde suas respectivas nomenclaturas estão listadas na Tabela 73.

Tabela 73 - Nomenclaturas dos elementos componentes das matrizes de conformação mecânica necessárias à execução da fixação e posicionamento da cabeça e chapa de articulação e fixação e posicionamento da cabeça do conjunto extrator

Sequência do Elemento	Nomenclatura
1	Dispositivo de Soldagem do Extrator
2	Base do Dispositivo
3	Espaçador
4	Batente do Produto
5	Pino Posicionador
6	Pressionador da Aba

Fonte: O Autor (2020)

4.20.7.4 Matrizes de Conformação Mecânica da Haste de Transmissão

4.20.7.4.1 Matriz de Posicionamento e Dobramento

A matriz de conformação mecânica necessária ao posicionamento e dobramento do arame da haste de transmissão cortado foi desenvolvida com base em um total de cinco elementos, onde suas respectivas nomenclaturas estão listadas na Tabela 74.

Tabela 74 - Nomenclaturas dos elementos componentes da matriz de conformação mecânica necessária ao posicionamento e dobramento do arame da haste de transmissão cortado

Sequência do Elemento	Nomenclatura
1	Dispositivo de Dobra da Haste de Transmissão
2	Base
3	Punção de Dobra
4	Espiga Maior
5	Espiga Menor

Fonte: O Autor (2020)

4.21 FABRICAÇÃO DO DISPOSITIVO DESENVOLVIDO

Após a fabricação e testes em campo de protótipos, foram fabricados os dispositivos desenvolvidos em sua versão final. Paralelamente foi realizado o aperfeiçoamento dos processos de fabricação, “*gabaritos*” e ferramentas utilizadas na fabricação dos protótipos, o desenvolvimento das matrizes de conformação mecânica e o respectivo processo de tratamento térmico. Ao fim de todas as fabricações, foram realizadas inspeções metrológicas por amostragem, utilizando os mesmos instrumentos de precisão listados na Tabela 32.

4.21.1 Fabricação da Base

Visando a fabricação da base do dispositivo desenvolvido em sua versão final, assim como das respectivas matrizes de conformação mecânica listadas da Tabela 92, foi necessária a utilização de processos de usinagem e corte a laser, ambos controlados por CNC, com base em programação específica gerada a partir de plataforma CAM.

4.21.1.1 Aparelhagem

A aparelhagem necessária à execução da fabricação da base do dispositivo desenvolvido, assim como das matrizes de conformação mecânica necessárias às execuções dos processos de fixação, dobramento e abaulamento envolvidos está listada na Tabela 75, juntamente com suas especificações técnicas.

Tabela 75 - Aparelhagem necessária à execução da fabricação da base do dispositivo desenvolvido, assim como das matrizes de conformação mecânica necessárias às execuções dos processos de fixação, dobramento e abaulamento envolvidos

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Centro de Usinagem CNC	Romi	D1250	016-009634-456
Máquina CNC de Corte a Laser	Cutlite do Brasil	Blade 1000	Semisealed
Prensa Rotativa para Dobramento e Abaulamento	Real Indústria e Comércio LTDA	PER 8 Ton	90141
Fresa de Topo diâmetro 8mm em aço rápido (HSS)	Sandvik	-	-
Fresa de Topo diâmetro 4mm em aço rápido (HSS)	Sandvik	-	-
Broca diâmetro 8mm em aço rápido (HSS)	Sandvik	-	-
Broca diâmetro 5mm em aço rápido (HSS)	Sandvik	-	-

Fonte: O Autor (2020)

4.21.1.2 Procedimento

Visando a execução dos processos de corte do perfil externo, do repuxo destinado à inserção do ilhós da mola principal e furação por laser, os desenhos elaborados na plataforma CAD Solidworks® foram transferidos para a plataforma CAD Type Edit® versão 2003 atrelada à Máquina CNC de Corte a Laser, para reconhecimento por parte da sua plataforma CAM Smart Manager®, sendo gerados os respectivos códigos em comando numérico.

A chapa bruta é posicionada na máquina em posição previamente determinada, sendo executado o código CNC gerado, fazendo com que a máquina execute todos os processos programados.

A fabricação das matrizes de conformação mecânica destinadas à fixação, dobramento e abaulamento da chapa cortada e furada é realizada seguindo a mesma sequência de operações utilizada para a fabricação dos “*gabaritos*” e ferramentas listadas na Tabela 28, em centro de usinagem CNC. Após a execução dos processos a laser, as matrizes de fixação e dobramento são acopladas à prensa rotativa para dobramento e abaulamento. A chapa cortada e furada é fixada e posicionada de forma a ser submetida ao dobramento, por meio do acionamento da prensa. Após a execução do dobramento, as matrizes de fixação e dobramento são desacopladas da prensa rotativa para dobramento e abaulamento, dando lugar à matriz de abaulamento, acoplada na mesma posição. A chapa cortada, furada e dobrada é fixada e posicionada de forma a ser submetida ao abaulamento, por meio do acionamento da prensa.

4.21.2 Fabricação da Haste de Acionamento

Visando a fabricação da haste de acionamento do dispositivo desenvolvido, assim como das matrizes de conformação mecânica listadas da Tabela 62, foi necessária a utilização de processos de usinagem convencional.

4.21.2.1 Aparelhagem

A aparelhagem necessária à execução da fabricação da haste de acionamento do dispositivo desenvolvido, assim como das matrizes de conformação mecânica necessárias às execuções dos processos de corte, fixação, dobramento, furação e brasagem envolvidos está listada na Tabela 76, juntamente com suas especificações técnicas.

Tabela 76 - Aparelhagem necessária à execução da fabricação da haste de acionamento do dispositivo desenvolvido, assim como das matrizes de conformação mecânica necessárias às execuções dos processos de corte, fixação, dobramento, furação e brasagem envolvidos

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Máquina de Serra e Corte	Acra	SBS-1018S	990336
Máquina de Solda com Cilindro	Lincoln Eletric	Invertec V275-S	U1070812987
Solda de Prata 56%	Rhomos	-	-
Vareta para Solda de Prata 56%	Rhomos	-	-

Fonte: O Autor (2020)

4.21.2.2 Procedimento

Inicialmente as barras com diâmetro predeterminado são posicionadas paralelamente por meio de encosto, fixadas e seccionadas na máquina de serra e corte, originando assim o perfil retilíneo da haste de acionamento, sendo em seguida posicionadas e fixadas, uma a uma, na matriz de dobramento listada na Tabela 62. A matriz ao ser rotacionada atuará sobre a barra seccionada, dobrando-a de acordo com o perfil da mesma, até o limite especificado.

Por último, a haste de acionamento dobrada é posicionada e fixada na matriz que garante o correto posicionamento entre o pino e a mesma no momento da soldagem, sendo em seguida realizada a união da haste de acionamento e seu pino, por meio de brasagem.

4.21.3 Fabricação do Conjunto Extrator

Visando a fabricação do conjunto extrator do dispositivo desenvolvido, assim como das matrizes de conformação mecânica listadas da Tabela 94, foi necessária a utilização de processos de usinagem convencional, assim como processo de soldagem por brasagem.

4.21.3.1 Aparelhagem

A aparelhagem necessária à execução da fabricação do conjunto extrator do dispositivo desenvolvido, assim como das matrizes de conformação mecânica necessárias às execuções dos processos de dobramento e brasagem envolvidos está listada na Tabela 77, juntamente com suas especificações técnicas.

Tabela 77 - Aparelhagem necessária à execução da fabricação do conjunto extrator do dispositivo desenvolvido, assim como das matrizes de conformação mecânica necessárias às execuções dos processos de dobramento e brasagem envolvidos

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Fresadora Universal	Sunlike	-	-
Fresa de Topo diâmetro 8mm em metal duro	Sandvik	-	-
Fresa de Topo diâmetro 4mm em metal duro	Sandvik	-	-
Fresa de Disco diâmetro 2mm em aço rápido (HSS)	Pilama	-	-
Broca diâmetro 8mm em aço rápido (HSS)	Sandvik	-	-

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Broca diâmetro 5,2mm em aço rápido (HSS)	Sandvik	-	-
Broca diâmetro 5mm em aço rápido (HSS)	Sandvik	-	-
Temax 27mm com inserto em metal	Sandvik	-	-
Máquina de Solda com Cilindro	Lincoln Electric	Invertec V275-S	U1070812987
Solda de Prata 56%	Rhomos	-	-
Vareta para Solda de Prata 56%	Rhomos	-	-

Fonte: O Autor (2020)

4.21.3.2 Procedimento

Inicialmente uma peça bruta quadrática é fresada com o perfil desejado à cabeça do conjunto extrator, sendo posteriormente realizado um furo passante pela broca, assim como rasgos paralelo e transversal ao furo passante, com espessuras predeterminadas.

Em seguida, uma chapa bruta é fresada, furada e fixada na matriz de dobramento listada na Tabela 63, onde por meio do seu acionamento tem-se a configuração final desejada da chapa de articulação do conjunto.

Por último, a cabeça e a chapa de articulação são posicionadas na matriz de fixação listada na Tabela 63, para possam ser unidos por processo de brasagem. Em seguida a pastilha é unida à cabeça pelo mesmo processo de soldagem.

4.21.4 Fabricação do Eixo do Conjunto Extrator

Visando a fabricação do eixo do conjunto extrator do dispositivo desenvolvido, foi necessária a utilização dos mesmos processos e aparelhagem empregados na fabricação do eixo do conjunto extrator do protótipo, seguindo a mesma sequência de operações e procedimentos.

4.21.5 Fabricação dos Pinos de Fixação da Estrutura

Visando a fabricação dos pinos de fixação da estrutura do dispositivo desenvolvido, foi necessária a utilização dos mesmos processos e aparelhagem empregados na fabricação dos

pinos de fixação da estrutura do protótipo, seguindo a mesma sequência de operações e procedimentos.

4.21.6 Fabricação da Haste de Transmissão

Visando a fabricação da haste de transmissão do dispositivo desenvolvido, foi necessária a utilização de processos de corte e dobramento. Os processos utilizados na confecção da matriz de conformação mecânica necessária às execuções destes processos envolvidos, descritos na Tabela 64, foram usinagem convencional e soldagem, sendo acoplado um sistema de dobramento por acionamento pneumático, composto por uma fonte de alimentação de ar, três tubulações poliméricas, uma válvula direcional 3/2 vias pilotada pneumáticamente e um cilindro de dupla ação.

5.21.6.1 Aparelhagem

A aparelhagem necessária à execução da fabricação da haste de transmissão do dispositivo desenvolvido, assim como da matriz de conformação mecânica necessária às execuções dos processos de corte e dobramento envolvidos está listada na Tabela 78, juntamente com suas especificações técnicas.

Tabela 78 - Aparelhagem necessária à execução da fabricação da haste de acionamento do dispositivo desenvolvido, assim como da matriz de conformação mecânica necessária às execuções dos processos de corte e dobramento envolvidos

EQUIPAMENTO / INSTRUMENTO	FABRICANTE	MODELO	SÉRIE
Arco de Serra	Gedore	-	-
Serra de Fita	Starret	-	-

Fonte: O Autor (2020)

4.21.6.2 Procedimento

Inicialmente o arame com diâmetro predeterminado é seccionado por meio de serra de fita, originando assim o perfil retilíneo da haste de transmissão, sendo em seguida posicionado e fixado na base da matriz de conformação mecânica listada na Tabela 64. Em seguida, é realizado o acionamento do cilindro pneumático, onde se dará o dobramento do arame, até a formatação especificada ser atingida.

4.22 DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE TRATAMENTO SUPERFICIAL

Em virtude da comprovação da eficácia do processo de tratamento superficial aplicado ao protótipo, foi utilizado o mesmo processo para o novo dispositivo em sua versão final.

4.23 MONTAGEM DOS DISPOSITIVOS DESENVOLVIDOS

Em virtude da necessidade de fabricação em lotes de dispositivos desenvolvidos, foi designada uma equipe de montagem rápida, com a finalidade de dar mais celeridade ao processo. Cada membro da equipe ficou responsável pela realização de uma etapa da montagem, de acordo com uma sequência lógica pré-determinada pela equipe de planejamento e controle de produção (PCP).

4.24 TESTES DOS DISPOSITIVOS DESENVOLVIDOS EM CAMPO E VALIDAÇÃO DO PROJETO

Em virtude da comprovação da viabilidade e eficácia do método utilizado na realização dos testes do protótipo em campo, o mesmo foi utilizado para o novo dispositivo em sua versão final, envolvendo as atividades de validação do processo de MOC, novas análises de design higiênico, instalação dos dispositivos desenvolvidos no equipamento, atividades de acompanhamento e análise de critérios de performance e tempo de vida útil dos dispositivos, de forma a se obter a validação final dos mesmos e com isso de todo o projeto, com base nos seus respectivos cálculos de custo-benefício e “*Pay Back*”.

5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir das execuções e implementações das atividades definidas nas etapas listadas nos fluxos de ações do desenvolvimento do protótipo e do dispositivo em sua versão final, em consonância com a metodologia WCM.

Estas atividades compreendem as análises e ensaios para identificação e caracterização de materiais, executados nos corpos de prova obtidos a partir das extrações de amostras de materiais dos dispositivos já existentes no equipamento e dispositivos originais nunca utilizados em operação, assim como de materiais desenvolvidos para compor os protótipos e novos dispositivos, em suas versões finais, as análises estruturais dos componentes críticos e das análises que abrangem o design higiênico e os demais critérios de performance e tempo de vida útil dos dispositivos já existente e desenvolvido, bem como as aplicações dos tratamentos térmico e superficial. Os resultados serão apresentados na mesma sequência de execução dos ensaios e análises realizados.

5.1 ANÁLISES DE ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓPTICA

5.1.1 Análises de Espectrometria de Emissão Óptica dos Materiais do Dispositivo de Extração Original

Os resultados da primeira análise para identificação de materiais do dispositivo de extração original, foram obtidos a partir da submissão dos materiais ao efeito da espectrometria por emissão óptica, sendo gerados os dados listados na Tabela 79.

Tabela 79 - Resultados da primeira análise de espectrometria de emissão óptica dos materiais do dispositivo de extração original

Elemento Químico	Amostra	Amostra	Elemento Químico	Amostra	Amostra
	AM-01 (Material Metálico)	AM-02 (Material Cerâmico)		AM-01 (Material Metálico)	AM-02 (Material Cerâmico)
	% Presente	% Presente		% Presente	% Presente
C	1,37	7,94	V	0,14	0

Elemento Químico	Amostra AM-01	Amostra AM-02	Elemento Químico	Amostra AM-01	Amostra AM-02
	(Material Metálico)	(Material Cerâmico)		(Material Metálico)	(Material Cerâmico)
	% Presente	% Presente		% Presente	% Presente
Na	0,51	0	Cr	18,29	0
Mg	0,48	0	Mn	0,99	0
Al	0,59	0,44	Fe	59,56	0
Si	11,39	0	Co	0,17	3,57
P	0,08	0	Ni	5,99	0
S	0,05	0	Cu	0,14	0
K	0,19	0	Mo	0,02	0
Ca	0,04	0	W	0	88,06

Fonte: O Autor (2021)

Estes resultados levam à conclusão que na análise foi verificada a presença de sódio (Na), elemento químico que não parte da composição química de ligas metálicas, sendo constatado como impureza oriunda do processo de “*sanitização*” dos equipamentos da linha de produção, que é um processo rotineiro da Fábrica. Nesse caso, fez-se necessária a realização de uma nova análise de contra prova, a partir de materiais extraídos de dispositivos originais nunca utilizados em operação. Os resultados da análise de contra prova estão listados na Tabela 80.

Tabela 80 - Resultados da análise de contra prova de espectrometria de emissão óptica dos materiais do dispositivo de extração original

Elemento Químico	Amostra AM-01	Elemento Químico	Amostra AM-01
	(Material Metálico)		(Material Metálico)
	% Presente		% Presente
C	0,05	V	0,00
Na	0,00	Cr	18,20
Mg	0,00	Mn	0,97
Al	0,003	Fe	71,5
Si	0,49	Co	0,00
P	0,00	Ni	7,79
S	0,014	Cu	0,17

Elemento Químico	Amostra AM-01 (Material Metálico)	Elemento Químico	AmostraAM-01 (Material Metálico)
	% Presente		% Presente
K	0,00	Mo	0,03
Ca	0,00	W	0,00

Fonte: O Autor (2021)

Diante dos resultados obtidos a partir das análises de espectrometria por emissão óptica, verifica-se que o material do corpo do dispositivo tem a composição química de um Aço Inoxidável tipo 304 (austenítico) e o material da pastilha anexada ao sistema de extração do dispositivo tem a composição química de um metal duro sem revestimento (carbeto de tungstênio).

5.1.2 Análises de Espectrometria de Emissão Óptica dos Materiais do Protótipo do Dispositivo de Extração Desenvolvido

Os resultados das análises para identificação de materiais do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido, dentro do escopo definido no fluxo de ações pela metodologia WCM, foram obtidos a partir da submissão dos materiais ao efeito da espectrometria por emissão óptica, sendo gerados os dados listados na Tabela 81.

Tabela 81 - Resultados da análise de espectrometria de emissão óptica dos materiais do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido

Elemento Químico	Amostra AM-03 (Aço AISI 304)	Amostra AM-04 (Aço AISI 304)	Elemento Químico	Amostra AM-03 (Aço AISI 304)	Amostra AM-04 (Aço AISI 304)
	% Presente	% Presente		% Presente	% Presente
C	0,0299	0,0141	V	0,0510	0,0763
Si	0,3843	0,3266	W	0,0000	0,0099
Mn	1,1647	1,6228	Pb	0,0000	0,0040
P	0,0335	0,0336	Sn	0,0058	0,0091
S	0,0021	0,0256	As	0,0000	0,0000
Cr	17,7607	18,0642	Ca	0,0010	0,0003
Mo	0,1390	0,3932	Sb	0,0000	0,0000

Elemento Químico	Amostra	Amostra	Elemento Químico	Amostra	Amostra
	AM-03	AM-04		AM-03	AM-04
	(Aço AISI 304)	(Aço AISI 304)		(Aço AISI 304)	(Aço AISI 304)
	% Presente	% Presente		% Presente	% Presente
Ni	7,8491	8,2070	Se	0,0026	0,0024
Al	0,0000	0,0000	Ta	0,0000	0,0000
Co	0,1780	0,1903	B	0,0000	0,0003
Cu	0,2878	0,4373	N	0,0732	0,0988
Nb	0,0207	0,0157	Fe	71,9890	70,4499
Ti	0,0041	0,0040			

Fonte: O Autor (2021)

Diante dos resultados obtidos a partir das análises de espectrometria por emissão óptica, verifica-se que os materiais dos corpos de prova em formatos de chapa e cilíndrico têm a composição química de um Aço Inoxidável tipo 304 (austenítico), conforme planejado na etapa de dimensionamento, cálculo e parâmetros de projeto.

5.1.3 Análises de Espectrometria de Emissão Óptica dos Materiais Dispositivo de Extração Desenvolvido sem aplicação do Tratamento Térmico

Os resultados das análises para identificação de materiais do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico, dentro do escopo definido no fluxo de ações pela metodologia WCM, foram obtidos a partir da submissão dos materiais ao efeito da espectrometria por emissão óptica, sendo gerados os dados listados na Tabela 82.

Tabela 82 - Resultados da análise de espectrometria de emissão óptica dos materiais do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico

Elemento Químico	Amostra	Amostra	Elemento Químico	Amostra	Amostra
	AM-17	AM-18		AM-17	AM-18
	(Aço AISI 420)	(Aço AISI 420)		(Aço AISI 420)	(Aço AISI 420)
	% Presente	% Presente		% Presente	% Presente
C	0,3344	0,1574	V	0,0189	0,0415
Si	0,3489	0,4699	W	0,0000	0,0000
Mn	0,4924	0,6700	Pb	0,0000	0,0000

Elemento Químico	Amostra	Amostra	Elemento Químico	Amostra	Amostra
	AM-17	AM-18		AM-17	AM-18
	(Aço AISI 420)	(Aço AISI 420)		(Aço AISI 420)	(Aço AISI 420)
	% Presente	% Presente		% Presente	% Presente
P	0,0142	0,0225	Sn	0,0027	0,0035
S	0,0034	0,0175	As	0,0050	0,0044
Cr	13,8963	12,5724	Ca	0,0003	0,0009
Mo	0,8956	0,0802	Sb	0,0000	0,0000
Ni	0,1235	0,1891	Se	0,0000	0,0000
Al	0,0000	0,0063	Ta	0,0000	0,0000
Co	0,0129	0,0211	B	0,0000	0,0015
Cu	0,0295	0,0933	N	0,0593	0,0651
Nb	0,0000	0,0243	Fe	83,7332	85,5292
Ti	0,0014	0,0072			

Fonte: O Autor (2021)

Diante dos resultados obtidos a partir das análises de espectrometria por emissão óptica, verifica-se que os materiais dos corpos de prova em formatos de chapa e cilíndrico têm, conforme esperado, a composição química de um Aço Inoxidável tipo 420 (martensítico).

5.1.4 Análises de Espectrometria de Emissão Óptica dos Materiais Dispositivo de Extração Desenvolvido com aplicação do Tratamento Térmico

Os resultados das análises para identificação de materiais do dispositivo de extração desenvolvido, com a aplicação do tratamento térmico, dentro do escopo definido no fluxo de ações pela metodologia WCM, foram obtidos a partir da submissão dos materiais ao efeito da espectrometria por emissão óptica, sendo gerados os dados listados na Tabela 83.

Tabela 83 - Resultados da análise de espectrometria de emissão óptica dos materiais do dispositivo de extração desenvolvido, com a aplicação do tratamento térmico

Elemento Químico	Amostra	Amostra	Elemento Químico	Amostra	Amostra
	AM-31	AM-32		AM-31	AM-32
	(Aço AISI 420)	(Aço AISI 420)		(Aço AISI 420)	(Aço AISI 420)
	% Presente	% Presente		% Presente	% Presente
C	0,3483	0,1634	V	0,0220	0,0458
Si	0,3129	0,4790	W	0,0000	0,0000
Mn	0,5101	0,6729	Pb	0,0000	0,0000
P	0,0131	0,0258	Sn	0,0022	0,0029
S	0,0057	0,0195	As	0,0000	0,0043
Cr	13,8087	12,5049	Ca	0,0001	0,0013
Mo	1,0021	0,0861	Sb	0,0000	0,0000
Ni	0,1303	0,1969	Se	0,0000	0,0000
Al	0,0000	0,0080	Ta	0,0000	0,0000
Co	0,0102	0,0194	B	0,0000	0,0020
Cu	0,0278	0,0794	N	0,0407	0,0399
Nb	0,0000	0,0170	Fe	83,7353	85,6066
Ti	0,0000	0,0018			

Fonte: O Autor (2021)

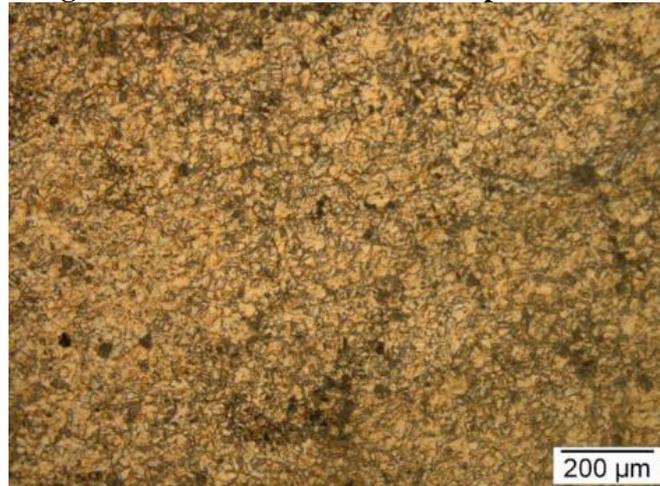
Diante dos resultados obtidos a partir das análises de espectrometria por emissão óptica, verifica-se que os materiais dos corpos de prova em formatos de chapa e cilíndrico têm, conforme esperado, a composição química de um Aço Inoxidável tipo 420 (martensítico). Verifica-se também que a aplicação do tratamento térmico de recozimento não causou alterações significativas nas quantidades percentuais dos elementos químicos do material.

5.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

5.2.1 Caracterização Microestrutural dos Materiais do Dispositivo de Extração Original

Os resultados da caracterização microestrutural, dentro do escopo definido no fluxo de ações pela metodologia WCM, foram obtidos a partir da visualização da micrografia do material metálico, conforme mostrado na Figura 38, sendo especificada a sua respectiva escala.

Figura 38 - Micrografia do material metálico do dispositivo de extração original



Fonte: O Autor (2019)

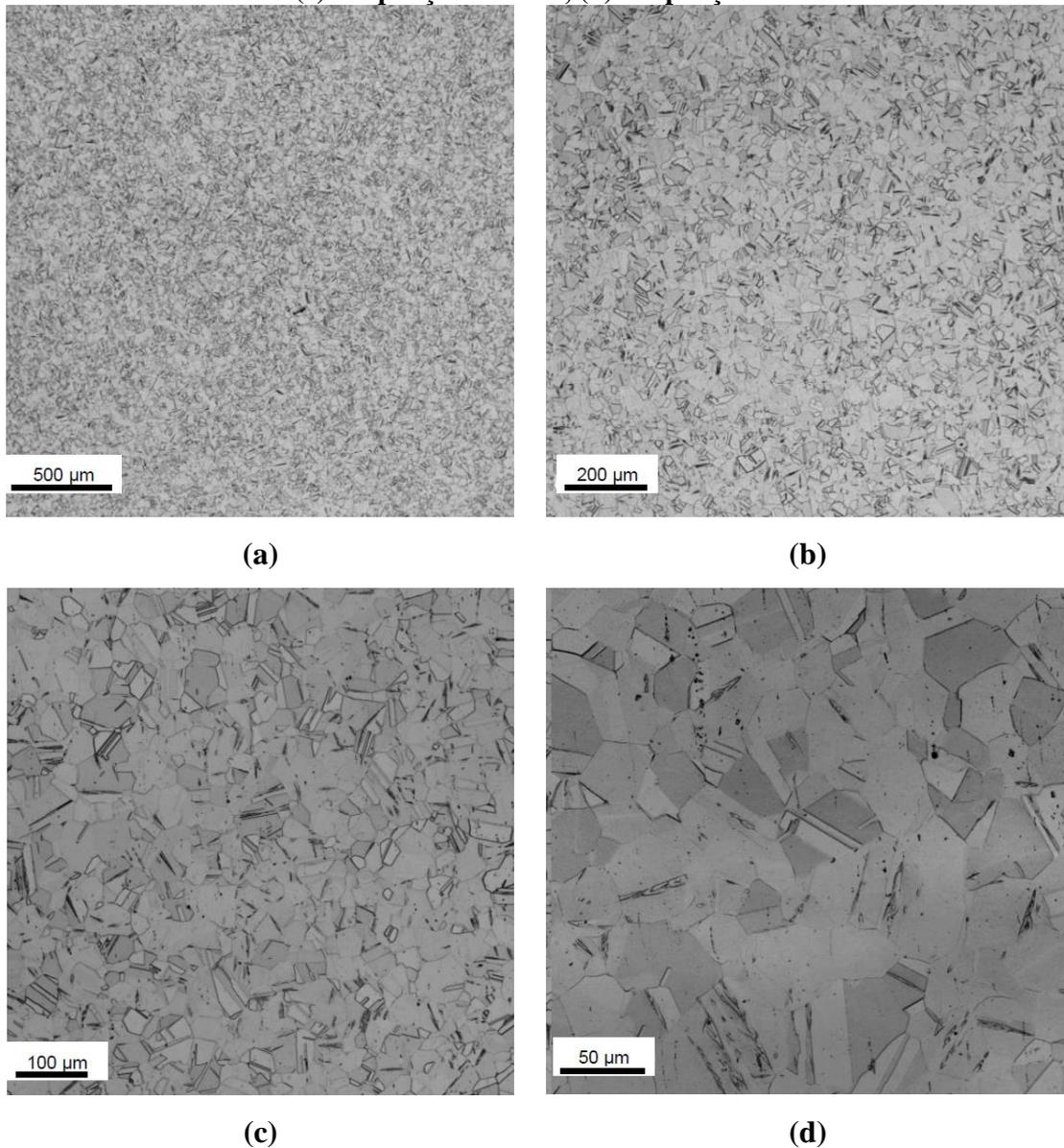
Diante dos resultados obtidos a partir da caracterização microestrutural, verifica-se que em virtude da equiaxialidade dos grãos, ou seja, o crescimento de cristais aproximadamente igual em todas as direções, o material apresenta características as quais levam a crer que o mesmo foi recozido.

Para fins de investigar mais profundamente a micrografia do material metálico em referência, fez-se necessário realiza uma nova caracterização microestrutural.

5.2.2 Caracterização Microestrutural dos Materiais do Protótipo do Dispositivo de Extração Desenvolvido

Os resultados da caracterização microestrutural, dentro do escopo definido no fluxo de ações pela metodologia WCM, foram obtidos a partir da visualização da micrografia dos materiais metálicos em formato de chapa, conforme mostrado na Figura 39, sendo especificada a sua respectiva escala.

Figura 39 - Micrografia dos materiais metálicos em formato de chapa do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido: (a) Ampliação em 5 X; (b) Ampliação em 10X; (c) Ampliação em 20X; (d) Ampliação em 50X

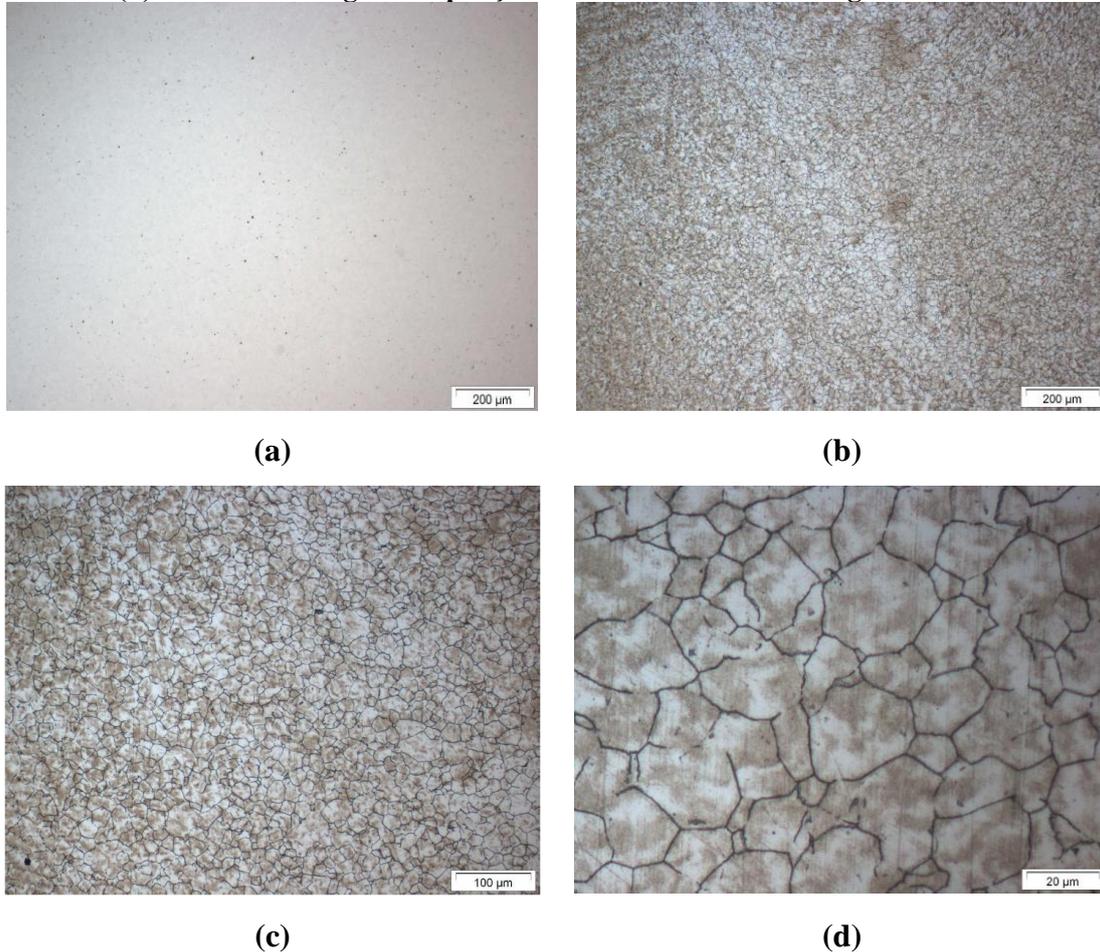


Fonte: O Autor (2019)

Diante dos resultados obtidos a partir da caracterização microestrutural, verifica-se a presença de microestrutura austenítica, conforme planejado na etapa de dimensionamento, cálculo e parâmetros de projeto.

Os resultados da caracterização microestrutural, dentro do escopo definido no fluxo de ações pela metodologia WCM, foram obtidos a partir da visualização da micrografia dos materiais metálicos em formato cilíndrico, conforme mostrado na Figura 40, sendo especificada a sua respectiva escala.

Figura 40 - Micrografia dos materiais metálicos em formato cilíndrico do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido: (a) Reativo sem ataque e ampliação em 100 X: (a) Presença de inclusões; (b) Reativo Kalling's e ampliação em 100X: Austenita; (c) Reativo Kalling's e ampliação em 200X: Austenita; (d) Reativo Kalling's e ampliação em 1.000X: Detalhe dos grãos de austenita



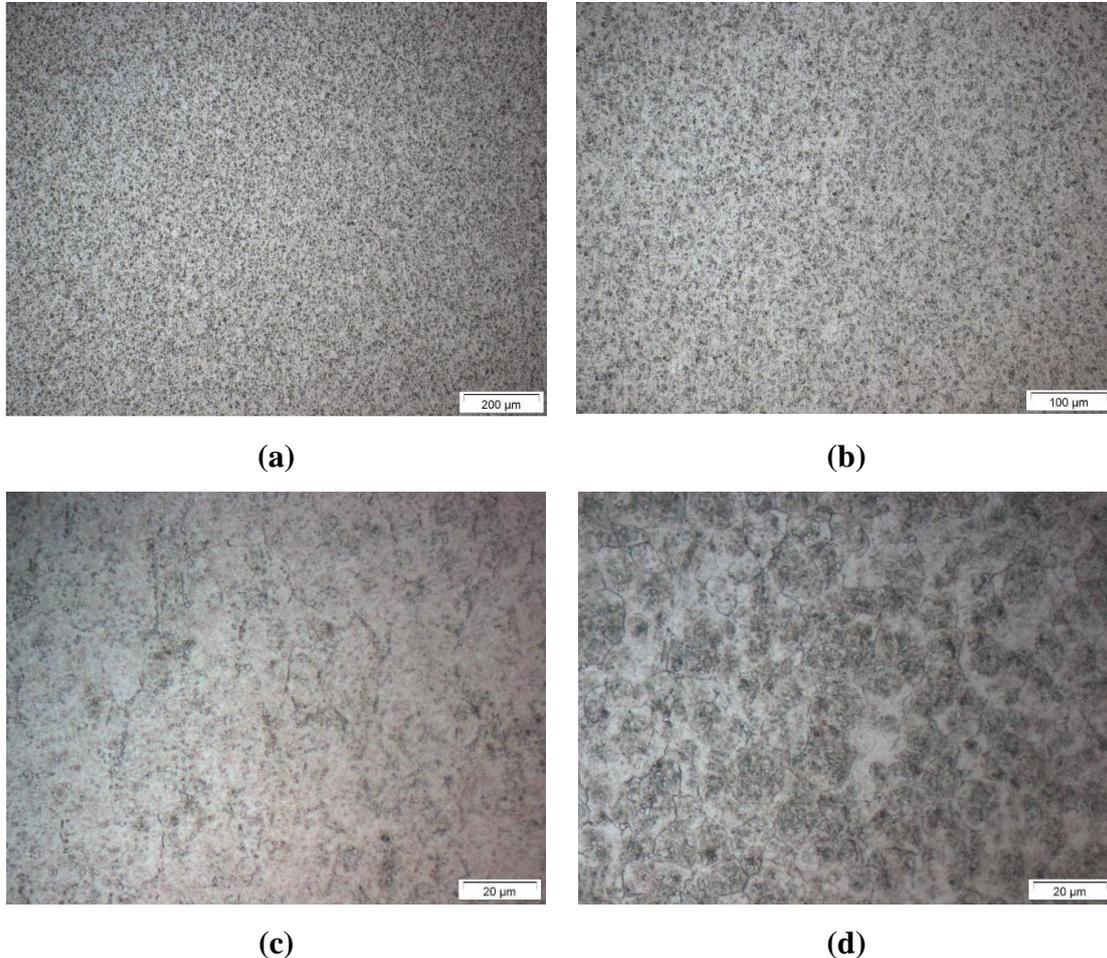
Fonte: O Autor (2019)

Diante dos resultados obtidos a partir da caracterização microestrutural, verifica-se a presença de grãos equiaxiais de austenita e a presença de inclusões típicas de óxidos e sulfetos, conforme planejado na etapa de dimensionamento, cálculo e parâmetros de projeto.

5.2.3 Caracterização Microestrutural dos Materiais do Dispositivo de Extração Desenvolvido sem aplicação do Tratamento Térmico

Os resultados da caracterização microestrutural, dentro do escopo definido no fluxo de ações pela metodologia WCM, foram obtidos a partir da visualização da micrografia dos materiais metálicos em formato de chapa, conforme mostrado na Figura 41, sendo especificada a sua respectiva escala.

Figura 41 - Micrografia dos materiais metálicos em formato de chapa do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico: (a) Reativo Vilella e ampliação em 100X: Martensita; (b) Reativo Vilella e ampliação em 200X: Martensita; (c) e (d): Reativo Vilella e ampliação em 1.000X: Detalhe da martensita e carbonetos esferoidizados



Fonte: O Autor (2020)

Diante dos resultados obtidos a partir da caracterização microestrutural, verifica-se a presença de martensita e carbonetos esferoidizados e a presença de inclusões típicas de óxidos e sulfetos, caracterizando assim o material com a micrografia típica de um Aço Inoxidável tipo 420 (martensítico), conforme esperado.

Os resultados da caracterização microestrutural, dentro do escopo definido no fluxo de ações pela metodologia WCM, foram obtidos a partir da visualização da micrografia dos materiais metálicos em formato cilíndrico, conforme mostrado na Figura 42, sendo especificada a sua respectiva escala.

Figura 42 - Micrografia dos materiais metálicos em formato cilíndrico do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem a aplicação do tratamento térmico:

(a) Reativo sem ataque e ampliação em 100 X: Presença de inclusões;

(b) Reativo Vilella e ampliação em 100X: Ferrita e carbonetos esferoidizados;

(c) Reativo Vilella e ampliação em 200X: Ferrita e carbonetos esferoidizados;

(d): Reativo Vilella e ampliação em 1.000X: Detalhe da ferrita e carbonetos esferoidizados



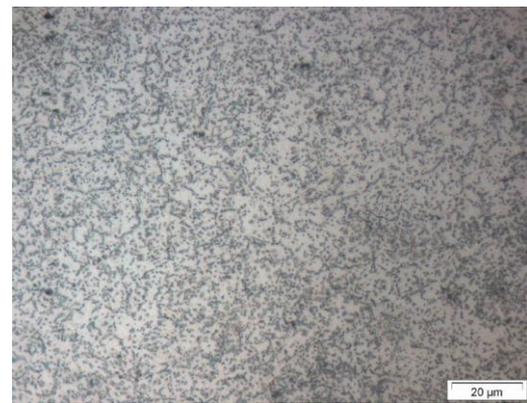
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: O Autor (2020)

Diante dos resultados obtidos a partir da caracterização microestrutural, verifica-se a presença de ferrita e carbonetos esferoidizados e a presença de inclusões típicas de óxidos e sulfetos, caracterizando assim o material com a micrografia típica de um Aço Inoxidável tipo 420 (martensítico), conforme esperado.

5.2.4 Caracterização Microestrutural dos Materiais do Dispositivo de Extração Desenvolvido com aplicação do Tratamento Térmico

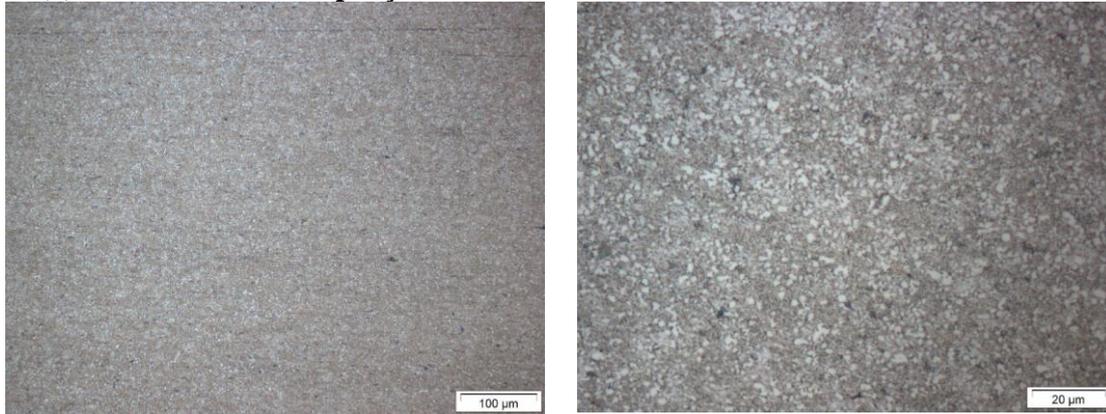
Os resultados da caracterização microestrutural, dentro do escopo definido no fluxo de ações pela metodologia WCM, foram obtidos a partir da visualização da micrografia dos

materiais metálicos em formato de chapa, conforme mostrado na Figura 43, sendo especificada a sua respectiva escala.

Figura 43 - Micrografia dos materiais metálicos em formato de chapa do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido, com a aplicação do tratamento térmico:

(a) Reativo Vilella e ampliação em 200X: Ferrita e carbonetos esferoidizados;

(b) Reativo Vilella e ampliação em 1.000X: Detalhe da ferrita e carbonetos esferoidizados



(a)

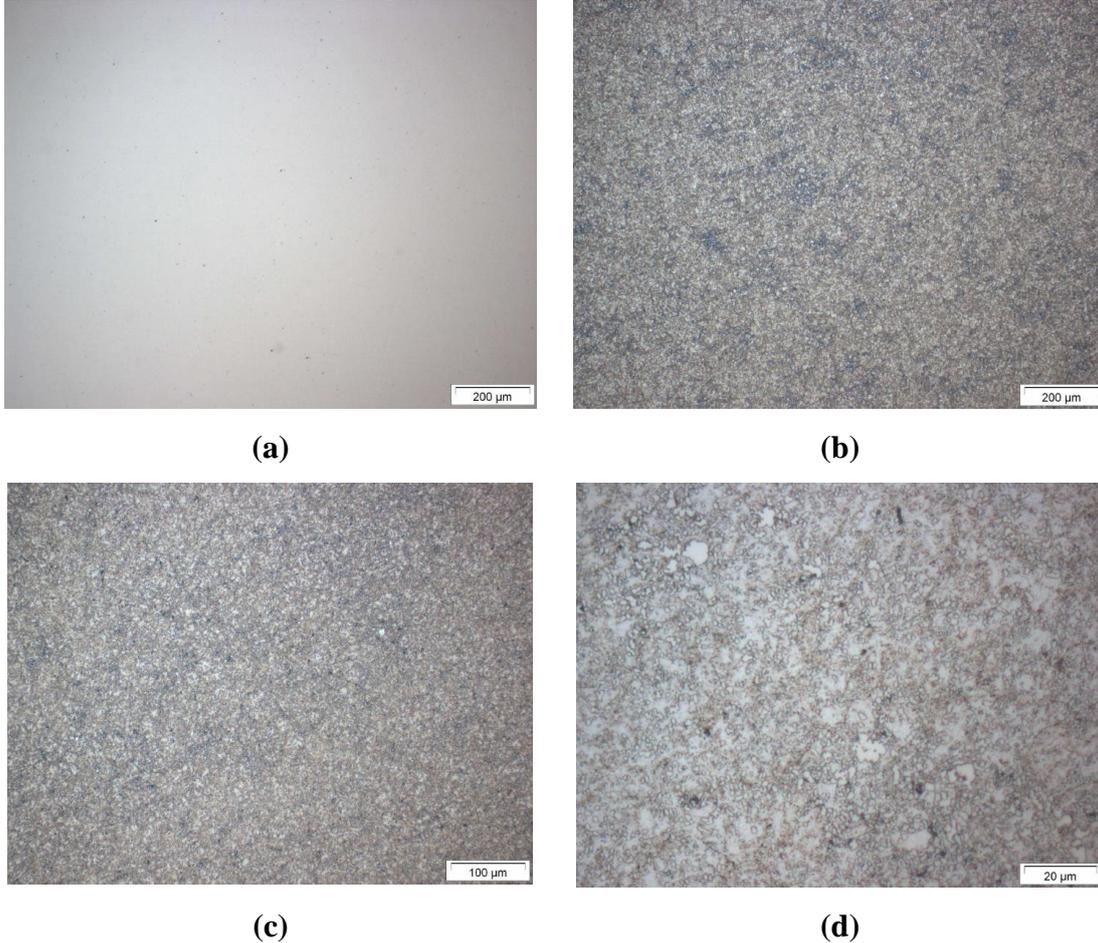
(b)

Fonte: O Autor (2020)

Diante dos resultados obtidos a partir da caracterização microestrutural, verifica-se a presença de ferrita e carbonetos esferoidizados e a presença de inclusões típicas de óxidos e sulfetos, caracterizando assim o material com a micrografia típica de um Aço Inoxidável tipo 420 (martensítico), conforme esperado. Verifica-se também que a aplicação do tratamento térmico de recozimento ocasionou uma alteração micrográfica no material, com a presença de ferrita em substituição à presença de martensita.

Os resultados da caracterização microestrutural, dentro do escopo definido no fluxo de ações pela metodologia WCM, foram obtidos a partir da visualização da micrografia dos materiais metálicos em formato cilíndrico, conforme mostrado na Figura 44, sendo especificada a sua respectiva escala.

Figura 44 - Micrografia dos materiais metálicos em formato cilíndrico do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido, com a aplicação do tratamento térmico: (a) Reativo sem ataque e ampliação em 100 X: Presença de inclusões; (b) Reativo Vilella e ampliação em 100X: Ferrita e carbonetos esferoidizados; (c) Reativo Vilella e ampliação em 200X: Ferrita e carbonetos esferoidizados; (d): Reativo Vilella e ampliação em 1.000X: Detalhe da ferrita e carbonetos esferoidizados



Fonte: O Autor (2020)

Diante dos resultados obtidos a partir da caracterização microestrutural, verifica-se a presença de ferrita e carbonetos esferoidizados e a presença de inclusões típicas de óxidos e sulfetos, caracterizando assim o material com a micrografia típica de um Aço Inoxidável tipo 420 (martensítico), conforme esperado. Verifica-se também que a aplicação do tratamento térmico de recozimento não causou alterações significativas na micrografia do material.

5.3 ANÁLISES DE DUREZA

5.3.1 Análises de Dureza do Dispositivo de Extração Original

Os resultados das análises de dureza para identificação de materiais do dispositivo de extração original, dentro do escopo definido no fluxo de ações pela metodologia WCM, foram

obtidos a partir da submissão dos materiais a elementos penetradores, sendo gerados os dados listados na Tabela 84.

Tabela 84 - Resultados das análises de dureza dos materiais do dispositivo de extração original

Tipo de Análise	Amostra AM-01 (Material Metálico)		Amostra AM-02 (Material Cerâmico)	
	Dureza Média	Desvio Padrão	% Presente	Desvio Padrão
Dureza Vickers	172,27 HV	3,87	940,00 HV	0,67
Dureza Rockwell C	4,00 HRC	3,87	68,00 HRC	0,67

Fonte: O Autor (2020)

Diante dos resultados obtidos e para fins de investigar mais profundamente a dureza do material metálico em referência, fez-se necessário realiza novas análises de dureza para o mesmo. Verifica-se que não há a necessidade da realização de uma nova análise para o material cerâmico extraído da pastilha, tendo em vista que os valores listados estão coerentes com o tipo de material analisado.

5.3.2 Análises de Dureza dos Materiais do Protótipo do Dispositivo de Extração Desenvolvido

Os resultados das análises de dureza para identificação de materiais do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido, dentro do escopo definido no fluxo de ações pela metodologia WCM, foram obtidos a partir da submissão dos materiais a elementos penetradores, sendo gerados os dados listados na Tabela 85.

Tabela 85 - Resultados das análises de dureza dos materiais do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido

Tipo de Análise	Amostra AM-15 (Aço AISI 304)		Amostra AM-16 (Aço AISI 304)	
	Dureza Média	Desvio Padrão	Dureza Média	Desvio Padrão
Dureza Vickers	198,66 HV	4,46	238,20 HV	5,34
Dureza Rockwell C	11,00 HRC	4,46	20,00 HRC	5,34

Fonte: O Autor (2020)

Diante dos resultados obtidos a partir das análises de dureza, verifica-se que os materiais dos corpos de prova em formatos de chapa e cilíndrico têm, conforme esperado, a faixa de durezas esperadas para um Aço Inoxidável tipo 304 (austenítico). Os valores apresentados pelos corpos de prova em formatos cilíndricos são superiores aos valores apresentados pelos corpos de prova em formatos de chapa.

5.3.3 Análises de Dureza dos Materiais do Dispositivo de Extração Desenvolvido sem aplicação do Tratamento Térmico

Os resultados das análises de dureza para identificação de materiais do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem aplicação do tratamento térmico, dentro do escopo definido no fluxo de ações pela metodologia WCM, foram obtidos a partir da submissão dos materiais a elementos penetradores, sendo gerados os dados listados na Tabela 86.

Tabela 86 - Resultados das análises de dureza dos materiais do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem aplicação do tratamento térmico

Tipo de Análise	Amostra AM-29 (Aço AISI 420)		Amostra AM-30 (Aço AISI 420)	
	Dureza Média	Desvio Padrão	Dureza Média	Desvio Padrão
Dureza Vickers	227,80 HV	5,83	271,00 HV	6,93
Dureza Rockwell C	17,00 HRC	5,83	26,00 HRC	6,93

Fonte: O Autor (2020)

Diante dos resultados obtidos a partir das análises de dureza, verifica-se que os materiais dos corpos de prova em formatos de chapa e cilíndrico têm, conforme esperado, a faixa de durezas esperadas para um Aço Inoxidável tipo 420 (martensítico), superiores aos valores encontrados nos respectivos corpos de prova, em formatos de chapa e cilíndrico, em Aço Inoxidável tipo 304 (austenítico). Os valores apresentados pelos corpos de prova em formatos cilíndricos são superiores aos valores apresentados pelos corpos de prova em formatos de chapa.

5.3.4 Análises de Dureza dos Materiais do Dispositivo de Extração Desenvolvido com aplicação do Tratamento Térmico

Os resultados das análises de dureza para identificação de materiais do dispositivo de extração desenvolvido, com a aplicação do tratamento térmico, dentro do escopo definido no

fluxo de ações pela metodologia WCM, foram obtidos a partir da submissão dos materiais a elementos penetradores, sendo gerados os dados listados na Tabela 87.

Tabela 87 - Resultados das análises de dureza dos materiais do dispositivo de extração desenvolvido, com aplicação do tratamento térmico

Tipo de Análise	Amostra AM-43		Amostra AM-44	
	(Aço AISI 420)		(Aço AISI 420)	
	Dureza Média	Desvio Padrão	Dureza Média	Desvio Padrão
Dureza Vickers	198,40 HV	4,47	196,80 HV	4,48
Dureza Rockwell C	11,00 HRC	4,47	10,00 HRC	4,48

Fonte: O Autor (2020)

Diante dos resultados obtidos a partir das análises de dureza, verifica-se que a aplicação do tratamento térmico de recozimento no Aço Inoxidável tipo 420 (martensítico) provocou, conforme esperado, uma redução dos valores em relação aos encontrados nos respectivos corpos de prova, em formatos de chapa e cilíndrico, no mesmo material, sem a aplicação do tratamento térmico.

Estes valores são equivalentes aos encontrados nos mesmos tipos de corpos de prova em Aço Inoxidável tipo 304 (austenítico), respectivamente.

Não houve alteração significativa nos valores apresentados pelos corpos de prova em formatos cilíndricos em relação aos corpos de prova em formatos de chapa, em se tratando do mesmo tipo de material (Aço Inoxidável tipo 420 martensítico com aplicação do tratamento térmico de recozimento).

5.4 ENSAIOS DE TRAÇÃO

5.4.1 Ensaio de Tração dos Materiais do Protótipo do Dispositivo de Extração Desenvolvido

Os resultados dos ensaios de tração nos materiais do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido, dentro do escopo definido no fluxo de ações pela metodologia WCM, foram obtidos a partir da submissão dos materiais à tração uniaxial com aplicação de taxa de deformação parametrizada, sendo gerados os dados listados na Tabela 88.

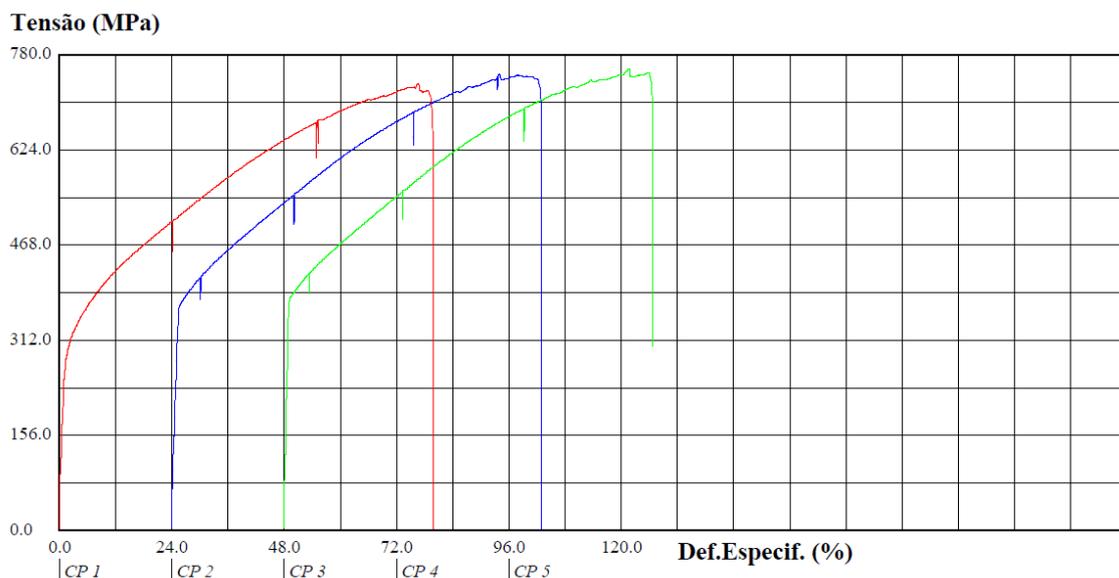
Tabela 88 - Resultados dos ensaios de tração dos materiais do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido

Nº Corpo de Prova	Formato da Amostra	Grandeza Avaliada	
		Limite de Resistência à Tração (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)
AM-07 (Aço AISI 304)	Chapa	-	-
AM-08 (Aço AISI 304)	Chapa	732,38	633,86
AM-09 (Aço AISI 304)	Chapa	748,84	650,08
AM-10 (Aço AISI 304)	Chapa	757,71	661,53
AM-11 (Aço AISI 304)	Cilindro	-	-
AM-12 (Aço AISI 304)	Cilindro	1038,34	1038,34
AM-13 (Aço AISI 304)	Cilindro	1189,78	1038,34
AM-14 (Aço AISI 304)	Cilindro	938,11	1038,34

Fonte: O Autor (2020)

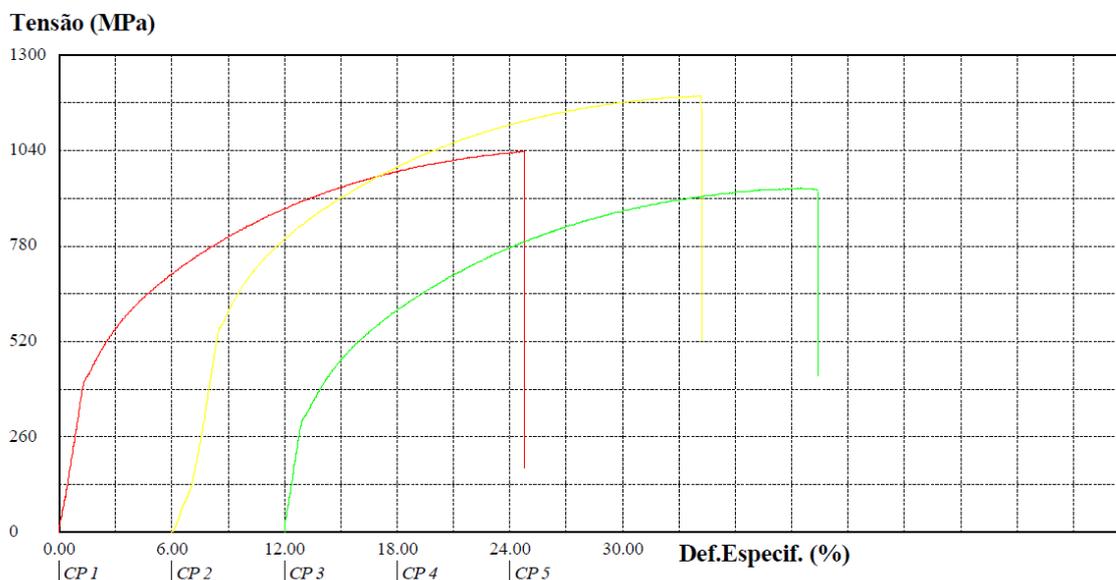
O comportamento das curvas tração-deformação dos materiais do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido, obtidas a partir dos ensaios de tração nos materiais em formato de chapa e cilíndrico são mostradas nas Figuras 45 e 46, respectivamente.

Figura 45 - Comportamento das curvas tração-deformação dos materiais em formato de chapa do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido, gerados pelo software Mattest Automação Tesc® Versão 3.04



Fonte: O Autor (2019)

Figura 46 - Comportamento das curvas tração-deformação dos materiais em formato cilíndrico do protótipo do dispositivo de extração desenvolvido, gerados pelo software Mattest Automação Tesc® Versão 3.04



Fonte: O Autor (2019)

Diante dos resultados obtidos a partir dos ensaios de tração, verifica-se que os corpos de prova em formatos de chapa apresentam menor limite de resistência à tração e menor tensão de ruptura que os corpos de prova em formatos cilíndricos.

Os valores listados na Tabela 88 são coerentes com o tipo de material analisado (Aço Inoxidável AISI 304 austenítico).

5.4.2 Ensaios de Tração dos Materiais do Dispositivo de Extração Desenvolvido sem aplicação do Tratamento Térmico

Os resultados dos ensaios de tração dos materiais do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem aplicação do tratamento térmico, dentro do escopo definido no fluxo de ações pela metodologia WCM, foram obtidos a partir da submissão dos materiais à tração uniaxial com aplicação de taxa de deformação parametrizada, sendo gerados os dados listados na Tabela 89.

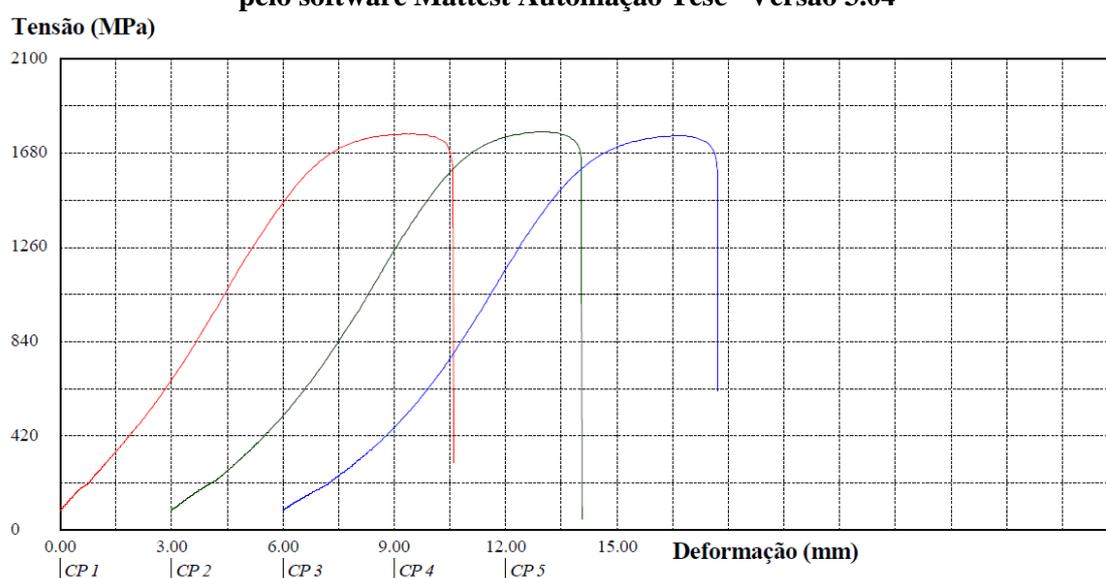
Tabela 89 - Resultados dos ensaios de tração dos materiais do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem aplicação do tratamento térmico

Nº Corpo de Prova	Formato da Amostra	Grandeza Avaliada	
		Limite de Resistência à Tração (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)
AM-21 (Aço AISI 420)	Chapa	-	-
AM-22 (Aço AISI 420)	Chapa	1768,12	1598,62
AM-23 (Aço AISI 420)	Chapa	1777,49	1668,64
AM-24 (Aço AISI 420)	Chapa	1759,67	1604,46
AM-25 (Aço AISI 420)	Cilindro	-	-
AM-26 (Aço AISI 420)	Cilindro	712,75	531,86
AM-27 (Aço AISI 420)	Cilindro	712,83	517,79
AM-28 (Aço AISI 420)	Cilindro	712,92	525,06

Fonte: O Autor (2020)

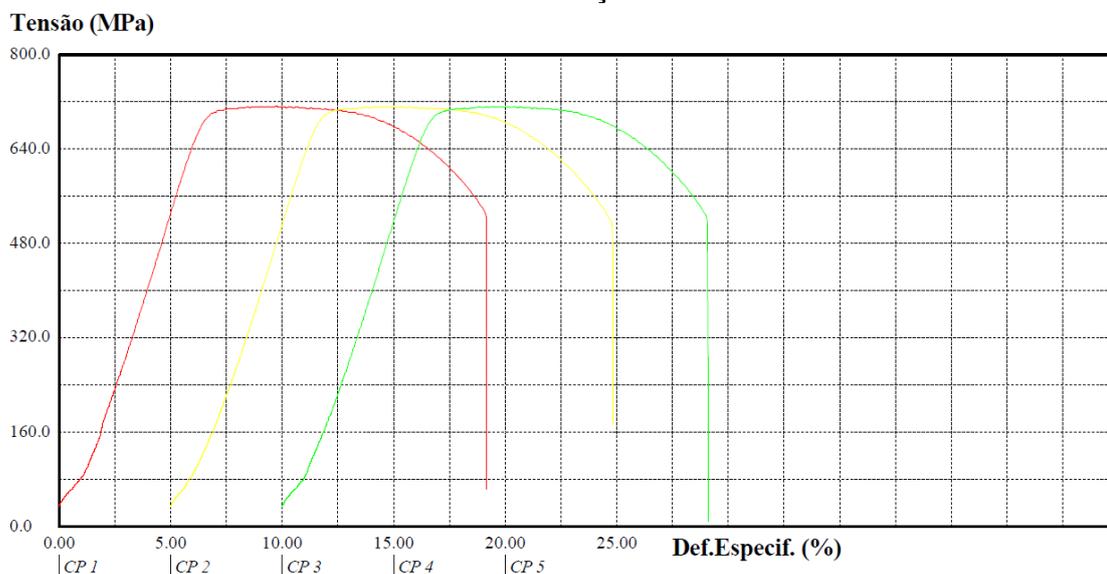
O comportamento das curvas tração-deformação dos materiais do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem aplicação do tratamento térmico, obtidas a partir dos ensaios de tração nos materiais em formato de chapa e cilíndrico são mostradas nas Figuras 47 e 48, respectivamente.

Figura 47 - Comportamento das curvas tração-deformação dos materiais em formato de chapa do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem aplicação do tratamento térmico, gerados pelo software Matest Automação Tesc® Versão 3.04



Fonte: O Autor (2020)

Figura 48 - Comportamento das curvas tração-deformação dos materiais em formato cilíndrico do dispositivo de extração desenvolvido, ainda sem aplicação do tratamento térmico, gerados pelo software Mattest Automação Tesc® Versão 3.04



Fonte: O Autor (2020)

Diante dos resultados obtidos a partir dos ensaios de tração, verifica-se que os corpos de prova em formatos de chapa apresentaram maior limite de resistência à tração e tensão de ruptura que os corpos de prova em formatos cilíndricos, ou seja, houveram alterações nestes valores em virtude das mudanças nos formatos dos corpos de prova.

Os valores listados na Tabela 89 são coerentes com o tipo de material analisado (Aço Inoxidável AISI 420 martensítico sem aplicação do tratamento térmico). Quando comparamos os tipos de materiais analisados, considerando os mesmos formatos de corpos de prova, verifica-se que para o formato de chapa os corpos de prova em Aço Inoxidável AISI 304 apresentam menor limite de resistência à tração e menor tensão de ruptura que os corpos de prova em Aço Inoxidável AISI 420 sem aplicação do tratamento térmico, conforme esperado.

Para o formato cilíndrico, os corpos de prova em Aço Inoxidável AISI 304 apresentam maior limite de resistência à tração e maior tensão de ruptura que os corpos de prova em Aço Inoxidável AISI 420, ainda sem aplicação do tratamento térmico, conforme esperado, em virtude do aumento da área de seção transversal desse formato em relação ao formato de chapa.

5.4.3 Ensaio de Tração dos Materiais do Dispositivo de Extração Desenvolvido com aplicação do Tratamento Térmico

Os resultados dos ensaios de tração dos materiais do dispositivo de extração desenvolvido, com aplicação do tratamento térmico, dentro do escopo definido no fluxo de ações pela metodologia WCM, foram obtidos a partir da submissão dos materiais à tração uniaxial com aplicação de taxa de deformação parametrizada, sendo gerados os dados listados na Tabela 90.

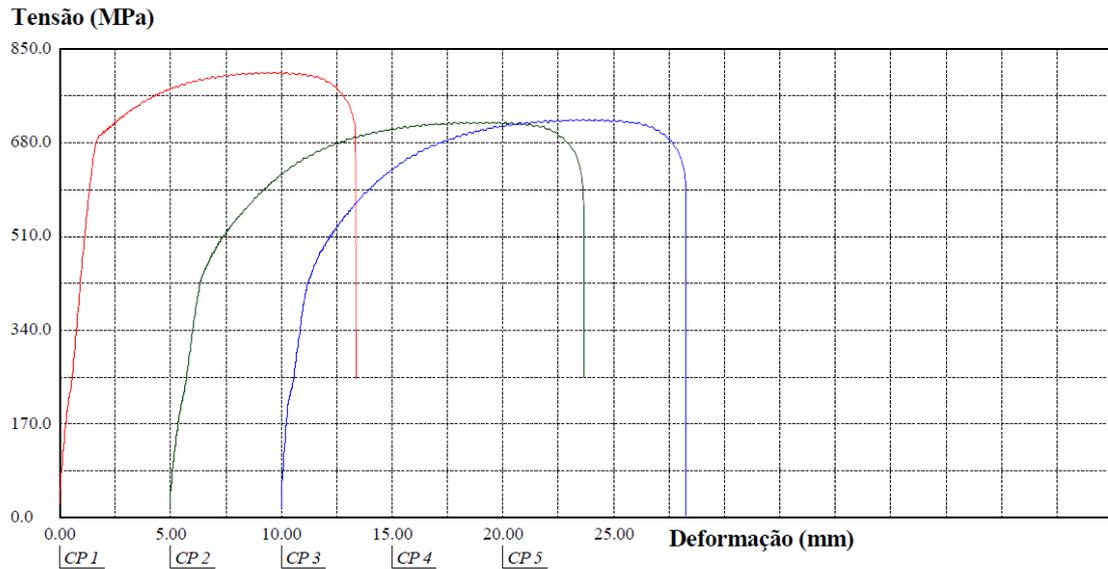
Tabela 90 - Resultados dos ensaios de tração dos materiais do dispositivo de extração desenvolvido, com aplicação do tratamento térmico

Nº Corpo de Prova	Formato da Amostra	Grandeza Avaliada	
		Limite de Resistência à Tração (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)
AM-35 (Aço AISI 420)	Chapa	-	-
AM-36 (Aço AISI 420)	Chapa	808,13	708,08
AM-37 (Aço AISI 420)	Chapa	717,93	576,91
AM-38 (Aço AISI 420)	Chapa	722,56	605,18
AM-39 (Aço AISI 420)	Cilindro	-	-
AM-40 (Aço AISI 420)	Cilindro	905,88	576,69
AM-41 (Aço AISI 420)	Cilindro	899,75	577,32
AM-42 (Aço AISI 420)	Cilindro	870,56	550,52

Fonte: O Autor (2020)

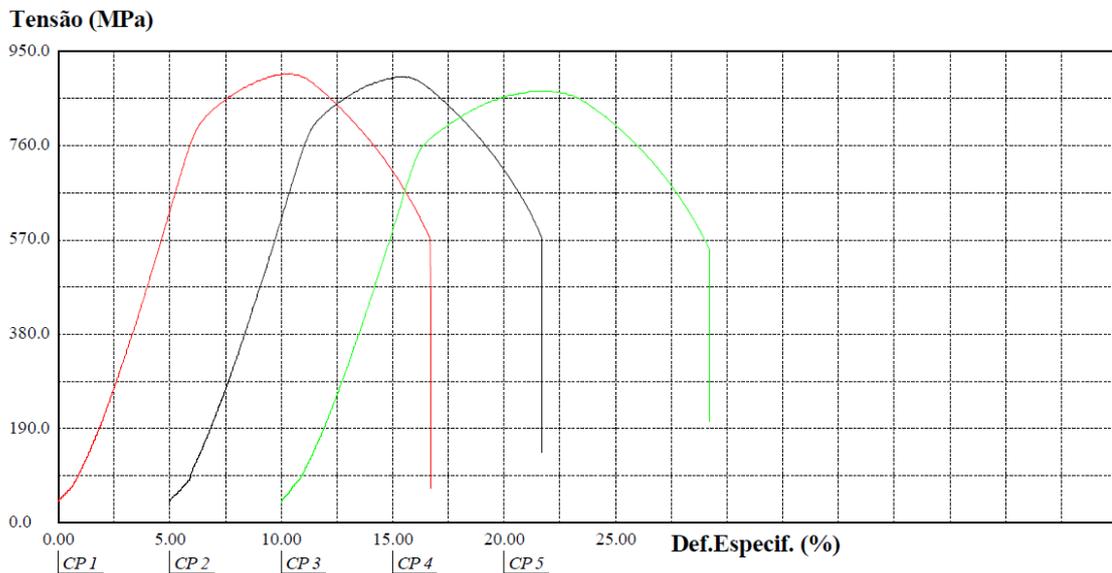
O comportamento das curvas tração-deformação dos materiais do dispositivo de extração desenvolvido, com aplicação do tratamento térmico, obtidas a partir dos ensaios de tração nos materiais em formato de chapa e cilíndrico são mostradas nas Figuras 49 e 50, respectivamente.

Figura 49 - Comportamento das curvas tração-deformação dos materiais em formato de chapa do dispositivo de extração desenvolvido, com aplicação do tratamento térmico, gerados pelo software Mattest Automação Tesc® Versão 3.04



Fonte: O Autor (2020)

Figura 50 - Comportamento das curvas tração-deformação dos materiais em formato cilíndrico do dispositivo de extração desenvolvido, com aplicação do tratamento térmico, gerados pelo software Mattest Automação Tesc® Versão 3.04



Fonte: O Autor (2020)

Diante dos resultados obtidos a partir dos ensaios de tração, verifica-se que os corpos de prova em formatos de chapa apresentaram menor limite de resistência à tração e maior tensão de ruptura que os corpos de prova em formatos cilíndricos.

Quando comparamos os tipos de materiais analisados, considerando os mesmos formatos de corpos de prova, verifica-se que para o formato de chapa os corpos de prova em Aço Inoxidável AISI 420 com aplicação de tratamento térmico de recozimento apresentam limite de resistência à tração e tensão de ruptura extremamente menores, quando comparados aos corpos de prova em Aço Inoxidável AISI 420 sem aplicação do tratamento térmico, apresentando valores bem próximos do Aço Inoxidável AISI 304, conforme esperado.

Para o formato cilíndrico, os corpos de prova em Aço Inoxidável AISI 420 com aplicação de tratamento térmico de recozimento apresentam maior limite de resistência à tração e maior tensão de ruptura que os corpos de prova em Aço Inoxidável AISI 420, ainda sem aplicação do tratamento térmico, conforme esperado, em virtude do aumento da área de seção transversal desse formato em relação ao formato de chapa.

Dessa forma, os valores listados na Tabela 90, são coerentes com o tipo de material analisado (Aço Inoxidável AISI 420 com aplicação do tratamento térmico).

5.5 ANÁLISES ESTRUTURAIS DO DISPOSITIVO ORIGINAL E DO DISPOSITIVO DESENVOLVIDO

Os resultados das análises estruturais, dentro do escopo definido no fluxo de ações pela metodologia WCM, serão expostos de forma separada, de acordo com cada componente estudado, sendo estes extraídos do dispositivo original ou do dispositivo desenvolvido.

5.5.1 Análise Estrutural do Conjunto Extrator do Dispositivo Original

Neste componente estrutural, é possível perceber que as tensões são muito inferiores a qualquer outro componente. A tensão máxima é de cerca de 5 megapascals, o que ainda é um valor irrisório quando considera-se o valor da tensão limite de escoamento do material (que é cerca de 206 megapascals).

Este valor de tensão é muito inferior aos outros componentes que foram analisados, e portanto fica claro que este componente não é crítico do ponto de vista estrutural, não sendo esperado, dessa forma, que este componente sofra uma falha mecânica. De toda forma, espera-se, com o material empregado no dispositivo desenvolvido, uma maior vida útil em termos de

desgaste por fadiga estrutural, em virtude do atrito gerado pelo contato deste componente com os palitos dos produtos.

5.5.2 Análise Estrutural do Conjunto Extrator do Dispositivo Desenvolvido

Neste componente estrutural, é também possível perceber que as tensões são muito inferiores a qualquer outro componente. A tensão máxima é de cerca de 4,56 megapascals, o que ainda é um valor irrisório quando considera-se o valor da tensão limite de escoamento do material (que é cerca de 345 megapascals).

Este valor de tensão é muito inferior aos outros componentes que foram analisados, e portanto fica claro que este componente não é um componente crítico do ponto de vista estrutural, não sendo esperado, dessa forma, que este componente sofra uma falha mecânica. Não há risco sequer de desgaste por fadiga estrutural, uma vez que a tensão máxima aplicada ao componente é muito menor que o limite de fadiga do material (CALLISTER, 2012). Os valores do fator de segurança ao longo da estrutura do componente (os quais giram em torno de quinze), também obtidos na análise, reforçam estas conclusões.

Dessa forma, é possível garantir que este componente está corretamente dimensionado. Os resultados mostram que os esforços nesta parte do dispositivo são ínfimos, o que se verifica com o que é observado na prática, onde não ocorrem quebras significativas no componente.

5.5.3 Análise Estrutural da Haste de Acionamento do Dispositivo Original

Observando o comportamento de uma série amostral de hastes laterais desgastadas, foi verificado que o choque ocorre há cerca de 25 milímetros da ponta superior, e não a 35 milímetros, como observado anteriormente.

Nesta análise foi considerada a medida de 25 milímetros, o que causa uma mudança significativa nos valores de tensões aplicadas, a qual não é explicada apenas pela mudança de material. Existem dois fatores que são preocupantes na estrutura do componente. O primeiro, no que diz respeito ao fator de segurança do mesmo, ou seja, a razão entre a tensão máxima admissível e o valor crítico obtido na análise (NORTON, 2013).

Para a análise, foi adotado como valor de tensão máxima admissível 225 megapascals, valor intermediário entre o máximo e mínimo, considerando que o material tenha uma qualidade razoável. Tendo em vista que encontramos pelo método dos elementos finitos o valor crítico de 205 megapascals, chegamos a um valor de fator de segurança em torno de 1,1. Isso significa que ele suportará até 10% de excesso, em relação ao esforço aplicado.

Contudo, 10% é um valor significativamente pequeno e preocupantemente baixo, uma vez que pequenas diferenças na qualidade do material, uma maior velocidade de operação do equipamento ou qualquer outro fator não considerado pode levar a um esforço maior, o que ocasionaria falha do componente. Analisando também o limite de compressão do material (CALLISTER, 2012), notamos uma redução do fator de segurança, fazendo com que qualquer esforço de maior grandeza leve o componente a uma falha estática simples.

Além disso, a faixa que se encontra o valor máximo da tensão (205 megapascals) é a faixa mais com maior variação dentre os ensaios de fadiga. Para este valor, por exemplo, a estrutura é capaz de suportar um total de cerca de 500 mil ciclos, contudo um esforço levemente superior (em torno de 230 megapascals) diminui esse número para pouco mais de 150 mil ciclos. Para obter-se a “*vida infinita do componente*” deve-se ter sempre uma tensão aplicada menor que 185 megapascals, conforme planejado na etapa de dimensionamento, cálculo e parâmetros de projeto.

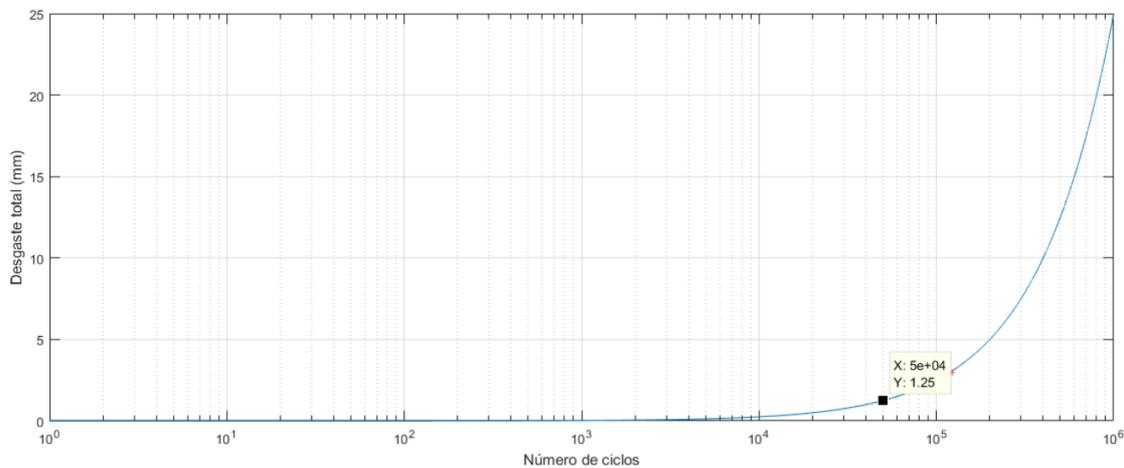
Um ciclo de acionamento é o número de vezes que há um carregamento e a mudança da sua componente alternada. Portanto, para o dispositivo, o número de ciclos por falha será a quantidade de vezes que a haste realiza um movimento de ciclo completo. Sabendo que o dispositivo opera uma vez a cada três minutos, durante vinte e uma horas ininterruptas, seis dias por semana, este viria a sofrer uma falha por fadiga em cerca de cento e trinta e oito dias, conforme mostrado na Figura 52.

Portanto, um melhor dimensionamento é necessário para evitar uma quebra constante, seja de forma estática (devido ao baixo fator de segurança) ou por fadiga (devido ao baixo número de ciclos). É possível observar que existe uma clara influência no valor do nível de tensão de possíveis alterações no material empregado e na localização do choque. Desses, a mudança do ponto de aplicação da força é o mais significativo, o que indica que o componente é sensível a esta mudança, e este fator é algo que deve ser observado caso se deseje realizar a

modificação do funcionamento do equipamento que contém o dispositivo, em alguma mudança futura.

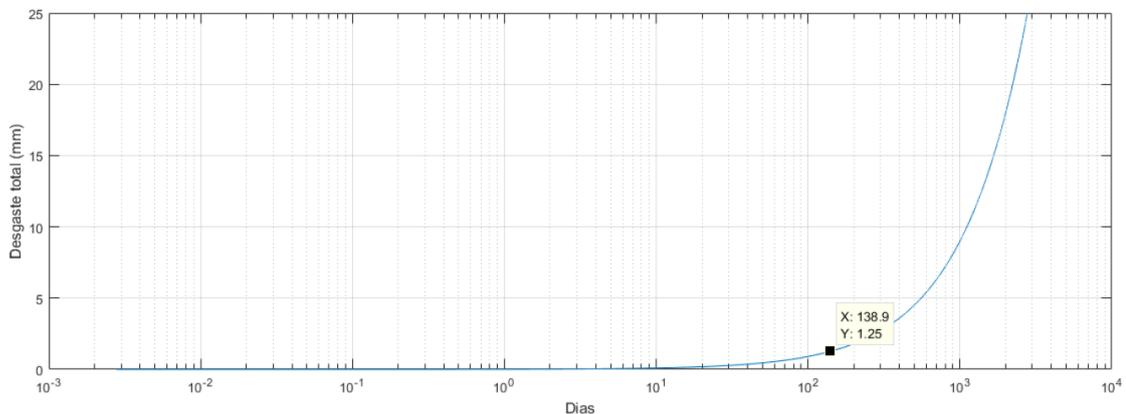
Além disso, devido ao alto nível de tensão, é esperado que a haste suporte um número relativamente baixo de ciclos, da ordem de 50 mil, apenas, conforme mostrado na Figura 51. Considerando esta marca, a haste de acionamento terá uma vida útil de cerca de 138 dias, conforme mostrado na Figura 52, respeitando o limite máximo de desgaste. As Figuras 51 e 52 foram geradas a partir do software MATLAB®.

Figura 51 - Curva de estimativa de vida útil (número de ciclos) da haste de acionamento do dispositivo original em relação ao seu desgaste



Fonte: O Autor (2019)

Figura 52 - Curva de estimativa de vida útil (número de dias) da haste de acionamento do dispositivo original em relação ao seu desgaste



Fonte: O Autor (2019)

5.5.4 Redimensionamento da Haste de Acionamento do Dispositivo Original

A partir das análises estruturais realizadas na haste de acionamento do dispositivo original, verifica-se a necessidade da realização do estudo de um possível redimensionamento do componente, modificando o valor do seu raio de curvatura, conforme planejado na etapa de dimensionamento, cálculo e parâmetros de projeto.

A mudança mais abrupta que percebemos é a queda do valor da tensão máxima para um pouco menos da metade do valor original. Isso ocorre exclusivamente devido a mudança do raio de curvatura do componente. Inicialmente existia uma curvatura acentuada (de 6,73 milímetros), e com a otimização da geometria esse valor evoluiu para 32,86 milímetros.

Esta alteração simples porém eficaz no projeto faz com que a estrutura do componente se torne mais flexível (onde é possível perceber o aumento na deflexão da estrutura, quando comparada com a estrutura original), mas também faz com que a estrutura redimensionada sofra tensões mais baixas do que a estrutura original. Esta alteração, além de reduzir o valor da tensão máxima, traz duas características consequentes, que proporcionam uma significativa diferença na vida útil do dispositivo. Uma dessas características é o aumento em mais de 50% do valor do fator de segurança do componente.

Esse valor é aceitável e permite assim que exista uma maior flexibilidade quanto a erros ou diferenças entre esta análise e a operação real do equipamento, alterando consequentemente a outra característica, que é o valor da tensão máxima para um valor abaixo do “*valor de vida infinita*”, o que significa que não é mais esperado que o dispositivo sofra avarias por conta da fadiga do componente, reduzindo consequentemente a possibilidade do mesmo perder a sua capacidade produtiva devido à falha mecânica desse componente.

5.5.5 Análise Estrutural da Haste de Acionamento do Dispositivo Desenvolvido

O componente apresenta valor de 216,07 megapascals para máxima tensão equivalente de Von-Mises, sendo uma tensão quase três vezes menor que a tensão de escoamento do material utilizado.

Considerando o raio de curvatura original, o fator de segurança mais crítico encontrado foi de aproximadamente 2,60, na região de curvatura da haste, conforme era esperado. Esse valor aparece em uma região com área pequena e com valor bem superior à unidade, indicando, dessa forma, que o componente suporta bem os esforços, nas condições analisadas.

Diferentemente do projeto da haste de acionamento do dispositivo original, cujas análises foram feitas utilizando o Aço Inoxidável AISI 304, neste projeto, utilizando o Aço Inoxidável AISI 420, e em se considerando o mantimento do valor do raio de curvatura, a haste de acionamento apresentou resultado de vida infinita (representada no software pelo valor de 1×10^8 ciclos em todo o corpo do componente). Sendo assim, a haste de acionamento, nesse caso, só viria a falhar por causas aleatórias e externas que não são previsíveis.

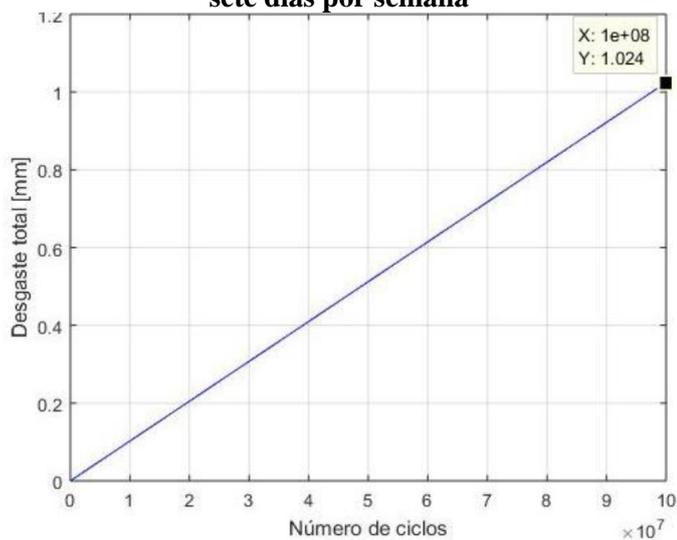
Considerando o raio de curvatura modificado, o fator de segurança mais crítico encontrado foi de aproximadamente 5,90, na região de curvatura da haste, conforme era esperado. Esse valor aparece em uma região com área pequena e com valor bem superior à unidade, indicando, dessa forma, que o componente suporta bem os esforços, nas condições analisadas.

O componente apresenta valor de 125,69 megapascals para máxima tensão equivalente de Von-Mises, sendo uma tensão quase quatro vezes e meia menor que a tensão de escoamento do material utilizado. Esta configuração apresenta quase a metade do valor de tensão máxima e está mais distribuída em comparação com a geometria em que o raio de curvatura da haste não foi modificado, validando a hipótese que o redimensionamento é válido quando se pretende aumentar o tempo de vida útil do componente.

Vale ainda salientar que, para os dois casos (com e sem modificação do raio de curvatura da haste), considerando que 1×10^8 ciclos, conforme mostrado na Figura 53, seja exatamente o momento da falha do componente e considerando a condição de que o dispositivo atua uma vez a cada três minutos e que a máquina funciona cerca de vinte e uma horas por dia, a vida útil do componente seria de aproximadamente 238.095 dias, que correspondem há cerca de 650 anos ininterruptos.

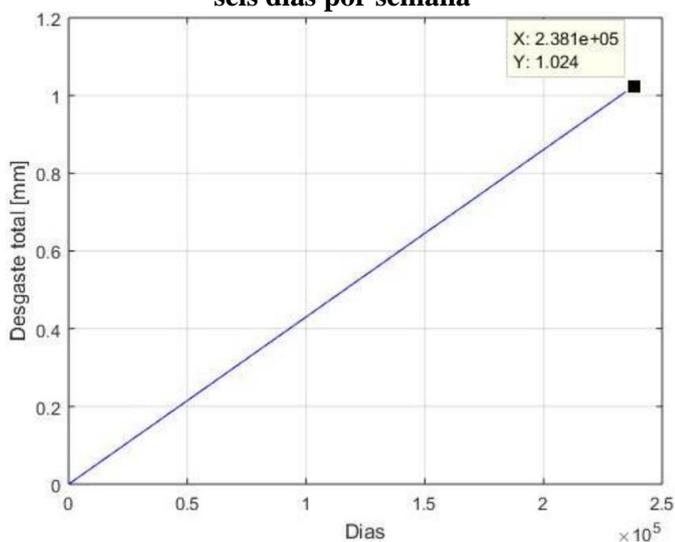
Considerando a semana com somente seis dias, a vida útil do componente seria de cerca de 760 anos, conforme mostrado na Figura 54, respeitando o limite máximo de desgaste. As Figuras 53 e 54 foram geradas a partir do software MATLAB®.

Figura 53 - Curva de estimativa de vida útil (número de ciclos) da haste de acionamento do dispositivo desenvolvido em relação ao seu desgaste, considerando a máquina em funcionamento sete dias por semana



Fonte: O Autor (2020)

Figura 54 - Curva de estimativa de vida útil (número de ciclos) da haste de acionamento do dispositivo desenvolvido em relação ao seu desgaste, considerando a máquina em funcionamento seis dias por semana



Fonte: O Autor (2020)

5.5.6 Análise Estrutural da Mola Principal do Dispositivo Original

As tensões estáticas estão distribuídas uniformemente ao longo do comprimento da mola, e, portanto, não há como reduzir a tensão máxima com alteração apenas no funcionamento da estrutura (considerando a mesma deformação). Apesar de inicialmente os valores das tensões aplicadas, em termos absolutos, serem superiores de forma significativa às aplicadas aos demais pontos e componentes analisados da estrutura, nota-se que, em se comparando à tensão limite de escoamento do material (entre 950 megapascals e 1250 megapascals), são proporcionalmente bem inferiores (CALLISTER, 2012). Por exemplo, apesar da tensão máxima ser próxima a 800 megapascals (em torno de quatro vezes superior à tensão máxima listada na análise da haste de acionamento), a mesma ainda está abaixo do limite de fadiga do material (1170 megapascals).

Com isso, constata-se que a mola principal não sofre fadiga devido aos esforços naturais de seu funcionamento, e como os casos onde este limite pode ser ultrapassado (velocidade ligeiramente maior, menor área de contato, entre outros) ocorrem com baixa frequência, podemos afirmar que uma mola, fabricada neste material, atuando sobre as condições citadas, não sofre avarias por fadiga.

5.5.7 Análise Estrutural da Mola Principal do Dispositivo Desenvolvido

As especificações técnicas da mola adotada e implementada no dispositivo desenvolvido foram disponibilizadas pela respectiva Empresa Fornecedora. Os resultados obtidos a partir dos ensaios dimensionais executados estão listados na Tabela 91, extraídos do certificado do produto número 038861, emitido por Empresa Fornecedora, em 13/12/2019.

Tabela 91 - Resultados ensaios dimensionais executados na mola principal do dispositivo de extração desenvolvido

Parâmetro	Unidade	Valor Especificado	Valor Encontrado	
			Mínimo	Máximo
Corpo Livre (L_0)	mm	$40,50 \pm 0,50$	40,00	41,00
Diâmetro Externo (D_e)	mm	$7,20 \pm 0,30$	7,20	7,40
Diâmetro do Arame (D)	mm	0,80	0,80	0,80

Fonte: O Autor (2020)

Os resultados da análise de composição química do material utilizado estão listados na Tabela 92, extraídos do certificado do produto número 007417/1, emitido por Empresa Fornecedora, em 13/12/2019.

Tabela 92 - Resultados da análise de composição química do material utilizado na mola principal do dispositivo de extração desenvolvido

Elemento	Amostra
Químico	% Presente
C	0,098
P	0,038
Cr	17,040
Ni	8,0300
Mn	0,890
S	0,009
Si	0,420

Fonte: O Autor (2020)

A tensão máxima atuante na mola corresponde a menos de 60% da tensão de escoamento do material adotado. O fator de segurança mais crítico encontrado foi de aproximadamente 1,74, já indicando uma margem satisfatória. O resultado de fator de segurança obtido a partir do software ANSYS®, o qual considera os esforços cíclicos, é ainda maior e apresenta o valor de 4,5. Os resultados apontam, portanto, que a mola principal suporta bem os esforços para as condições de carregamento analisadas.

Diante das especificações técnicas da mola principal disponibilizadas pela Empresa Fornecedora, podemos verificar que estas atendem totalmente aos requisitos do projeto, no tocante à implementação desse componente no dispositivo desenvolvido.

5.5.8 Análise Estrutural da Pastilha do Dispositivo Original

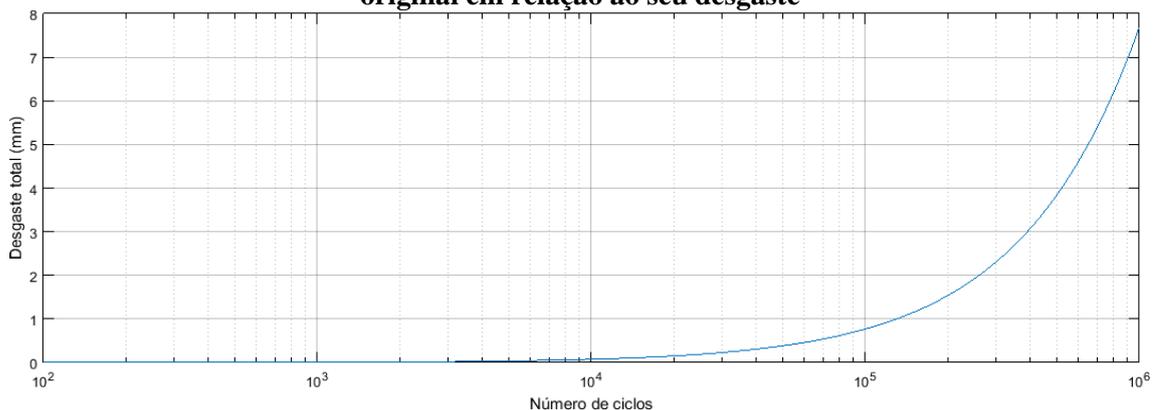
Utilizando a Equação 7, assim como adotando os valores listados a seguir para as respectivas incógnitas, encontramos um valor de profundidade de desgaste (d) de aproximadamente $3,46 \times 10^{-7}$ milímetros por ciclo completo de atuação (deslizamento) do dispositivo.

- $K_d = 10^{-4}$ (Dados obtidos a partir de PETERSON, 1980)
- $F = 29,4$ N (Dados obtidos a partir da análise estrutural do conjunto extrator)
- $L = 10$ mm
- $H = 4240$ MPa (Dados obtidos da Empresa Fornecedora do palito);
- $A_c = 20$ mm²

Considerando inicialmente um desgaste máximo admissível de cinco milímetros e que o equipamento funciona ininterruptamente durante oito horas por dia, com cada dispositivo executando sua função duas vezes por minuto, resulta num total de 541 dias aproximados de uso, conforme mostrado na Figura 55, considerando que todos os esforços são realizados conforme idealizado.

A curva mostrada na Figura 55 foi plotada a partir do software MATLAB®, em formato “*mono-log*”, usual para análise de fadigas, a partir da Equação 7. Para relacionarmos o desgaste com o número de ciclos, multiplicamos o comprimento de um único deslizamento pela quantidade de ciclos. É importante citar que, na teoria, quando maior o intervalo de aplicação do esforço, menor será a abrasão, tendo em vista um maior tempo para distribuição do aumento de temperatura, por exemplo.

Figura 55 - Curva de estimativa de vida útil (número de ciclos) da pastilha do dispositivo original em relação ao seu desgaste



Fonte: O Autor (2019)

Como alguns palitos podem ter dimensões ou durezas diferentes, foi adotada uma margem de segurança de 10%, resultando em uma vida útil da pastilha de aproximadamente 490 dias (um ano e quatro meses interrompidos ou dois anos considerando dias úteis).

Tendo em vista mudanças na estratégia do plano de produção para o equipamento, em virtude de mudanças de demandas de mercado, será necessário reavaliar o valor de desgaste máximo admissível em quatro milímetros, assim como o valor de oito horas de funcionamento diário do equipamento e a atuação do dispositivo de duas vezes por minuto.

Dessa forma, faz-se necessário a realização de um novo estudo de previsibilidade de tempo de vida útil da pastilha, visando o desenvolvimento desse componente, dentro do escopo do novo dispositivo desenvolvido.

5.5.9 Análise Estrutural da Pastilha do Dispositivo Desenvolvido

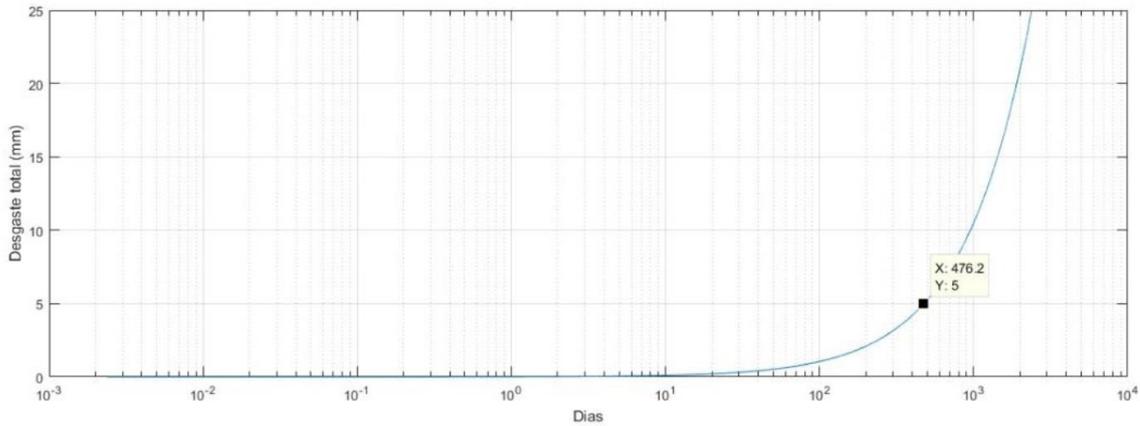
Utilizando a Equação 7, assim como adotando os valores listados a seguir para as respectivas incógnitas, encontramos um valor de profundidade de desgaste (d) de aproximadamente $1,213 \times 10^{-6}$ milímetros. O Valor da área de contato foi alterado para 40 milímetros quadrados, conforme recomendações da equipe de Engenharia da Empresa (área de contato de 10 mm x 4 mm ou 10 mm x 5 mm), sendo assim utilizada a menor área de contato indicada, em virtude de termos uma maior criticidade atrelada.

- $K_d = 7 \cdot 10^{-5}$ (Valor médio entre 10^{-4} e 5×10^{-6} , de acordo com PETERSON, 1980)
- $F = 29,4$ N (Dados obtidos a partir da análise estrutural do conjunto extrator)
- $L = 10$ mm
- $H = 4240$ MPa (Dados obtidos da Empresa Fornecedora do palito);
- $A_c = 40$ mm²

Considerando um novo desgaste máximo admissível de cinco milímetros e atendendo às mudanças na estratégia do plano de produção para o equipamento, foi adotado que o mesmo funciona ininterruptamente vinte e uma horas por dia, sendo seis dias por semana, com cada dispositivo executando sua função uma vez a cada três minutos.

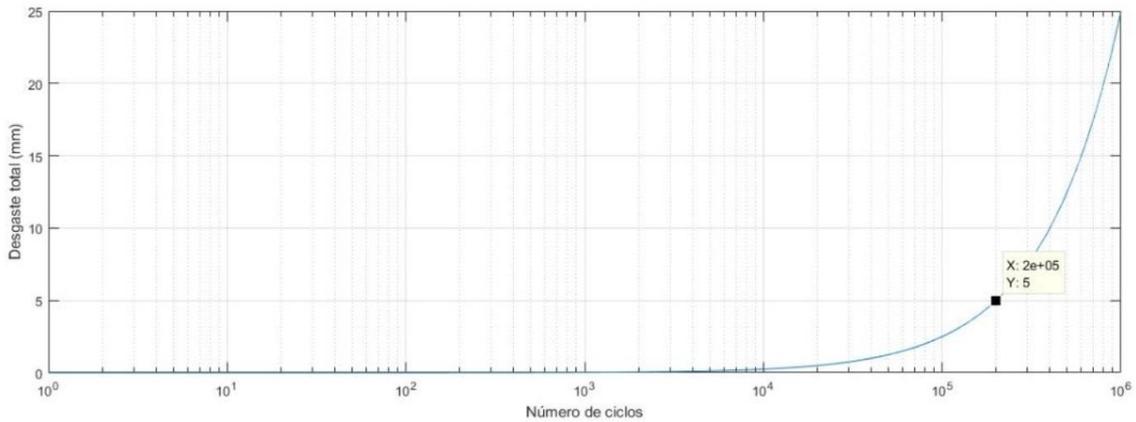
Com isso, obtemos um tempo estimado de uso de 476 dias, conforme mostrado na Figura 56, o que representa um total de 200.000 ciclos de acionamento, conforme mostrado na Figura 57.

Figura 56 - Curva de estimativa de vida útil (número de dias) da pastilha do dispositivo desenvolvido em relação ao seu desgaste, considerando um desgaste máximo admissível de cinco milímetros



Fonte: O Autor (2020)

Figura 57 - Curva de estimativa de vida útil (número de ciclos) da pastilha do dispositivo desenvolvido em relação ao seu desgaste, considerando um desgaste máximo admissível de cinco milímetros

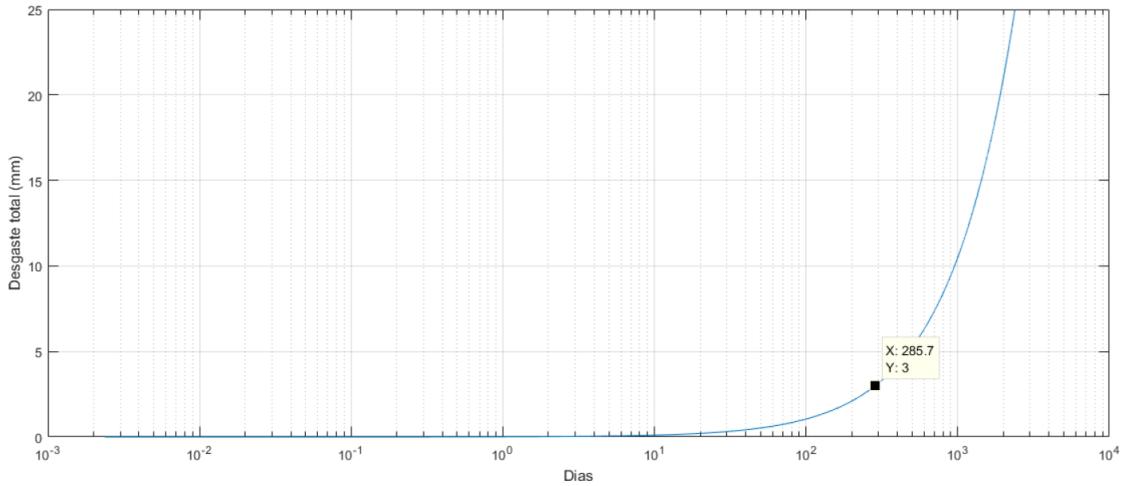


Fonte: O Autor (2020)

Considerando um novo desgaste máximo admissível de três milímetros e atendendo às mudanças na estratégia do plano de produção para o equipamento, foi adotado que o mesmo funciona ininterruptamente vinte e uma horas por dia, sendo seis dias por semana, com cada dispositivo executando sua função uma vez a cada três minutos.

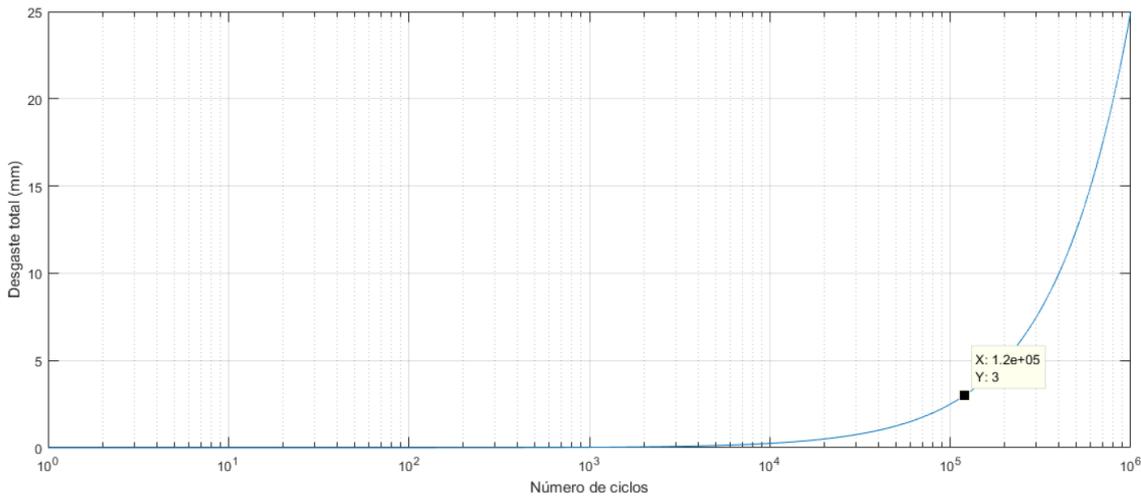
Com isso, obtemos um tempo estimado de uso de 285 dias, conforme mostrado na Figura 58, o que representa um total de 120.000 ciclos de acionamento, conforme mostrado na Figura 59.

Figura 58 - Curva de estimativa de vida útil (número de dias) da pastilha do dispositivo desenvolvido em relação ao seu desgaste, considerando um desgaste máximo admissível de três milímetros



Fonte: O Autor (2020)

Figura 59 - Curva de estimativa de vida útil (número de dias) da pastilha do dispositivo desenvolvido em relação ao seu desgaste, considerando um desgaste máximo admissível de três milímetros



Fonte: O Autor (2020)

Todas as curva mostradas nas Figuras 56, 57, 58 e 59 foram plotadas no mesmo software utilizado na análise da pastilha do dispositivo original (MATLAB[®]), assim como foram adotados os mesmos parâmetros e equações para esta análise. Estes dados foram obtidos considerando que todos os esforços são realizados conforme idealizado.

5.5.10 Análise Estrutural da Base do Dispositivo Original

O fator de segurança mais crítico encontrado foi de aproximadamente 3,19, na região do repuxo destinado à fixação da mola principal na base, conforme já era esperado, devido ao corte realizado na chapa. Esse valor aparece numa região pequena e é bem maior que à unidade. Isso indica que o componente suporta bem os esforços.

O componente apresenta valor de 64,001 megapascals para máxima tensão de Von-Mises, onde comparando com a tensão de escoamento do material utilizado, é quase quatro vezes menor. Porém, existe a expectativa que, com o uso de outro material, possa-se aumentar consideravelmente este valor, a fim de garantir uma maior robustez e confiabilidade a esse ponto crítico do componente.

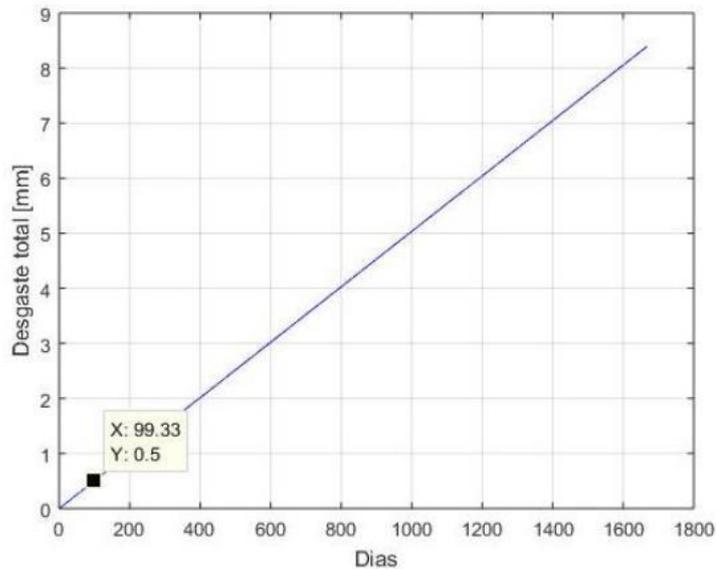
Com base nas Equações 7 e 8, assim como adotando os valores listados a seguir para as respectivas incógnitas, obtidos a partir dos encontramos um valor de profundidade de desgaste (d) de aproximadamente $2,25 \times 10^{-10}$ milímetros.

- $K_d = 7,370064 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{N.m}$ (JÚNIOR; CURI, 2017)
- $F = 29,4 \text{ N}$ (Dados obtidos a partir da análise estrutural do conjunto extrator)
- $L = 25 \times 10^{-2} \text{ m}$
- $A_c = 239,26 \times 10^{-6} \text{ m}^2$

Considerando o desgaste máximo admissível de meio milímetro (metade da espessura da chapa que constitui a base) e atendendo às mudanças na estratégia do plano de produção para o equipamento, foi adotado que o mesmo funciona ininterruptamente vinte e uma horas por dia, sendo seis dias por semana, com cada dispositivo executando sua função uma vez a cada três minutos.

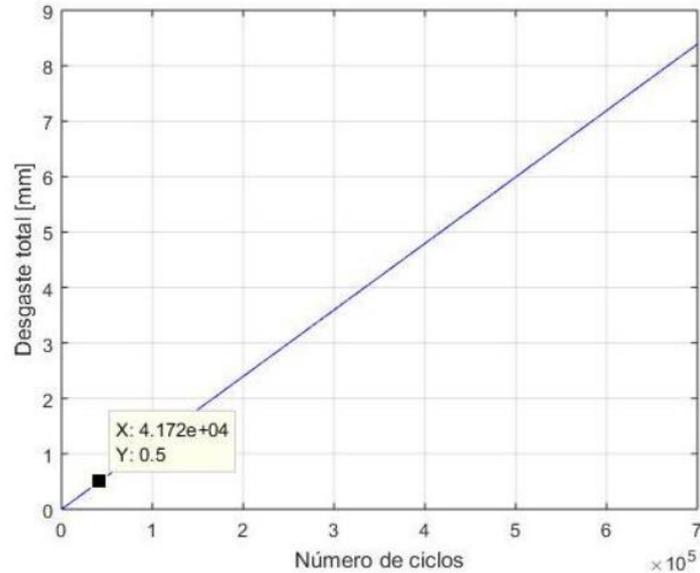
Com isso, obtemos um tempo estimado de uso de 3 meses e 22 dias, conforme mostrado na Figura 60, o que representa um total de $4,172 \times 10^4$ ciclos de acionamento, conforme mostrado na Figura 61.

Figura 60 - Curva de estimativa de vida útil (número de dias) da base do dispositivo desenvolvido em relação ao seu desgaste, considerando um desgaste máximo admissível de meio milímetro



Fonte: O Autor (2020)

Figura 61 - Curva de estimativa de vida útil (número de ciclos) da base do dispositivo desenvolvido em relação ao seu desgaste, considerando um desgaste máximo admissível de meio milímetro



Fonte: O Autor (2020)

5.5.11 Análise Estrutural da Base do Dispositivo Desenvolvido

O fator de segurança mais crítico encontrado foi de aproximadamente 8,44, também na região do repuxo destinado à fixação da mola principal na base, conforme já era esperado.

Esse valor aparece numa região pequena, assim como na análise estrutural da base do dispositivo original, tendo um valor quase três vezes maior.

O componente apresenta valor de 64,193 megapascals para máxima tensão de Von-Mises vezes, onde comparando com a tensão de escoamento do material utilizado, é quase nove vezes menor. Com isso, atende-se a expectativa que, com o uso de outro material, tem-se a garantia de uma maior robustez e confiabilidade a esse ponto crítico do componente.

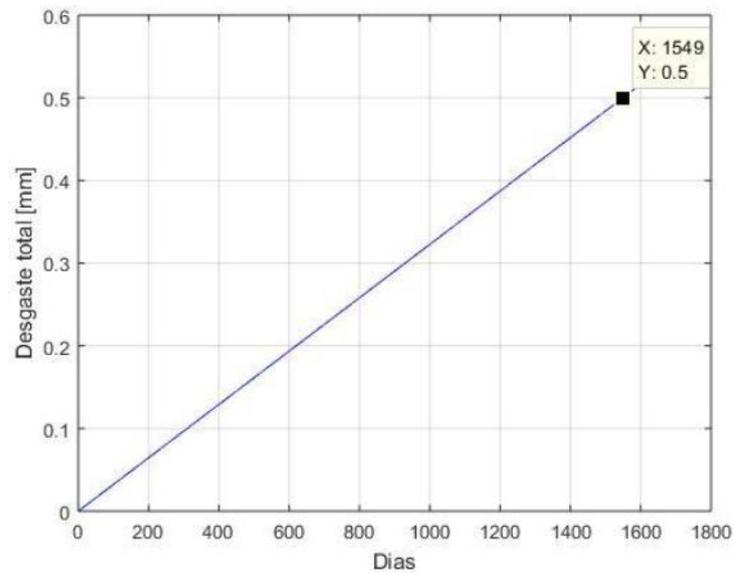
Utilizando as Equações 7 e 8, assim como adotando os valores listados a seguir para as respectivas incógnitas, encontramos um valor de profundidade de desgaste (d) de aproximadamente $2,25 \times 10^{-10}$ milímetros.

- $K_d = 8,23788 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{N.m}$ (SANTOS; NETO, 2015)
- $F = 29,4 \text{ N}$ (Dados obtidos a partir da análise estrutural do conjunto extrator)
- $L = 25 \times 10^{-2} \text{ m}$
- $A_c = 239,26 \times 10^{-6} \text{ m}^2$

Considerando o desgaste máximo admissível de meio milímetro (metade da espessura da chapa que constitui a base) e atendendo às mudanças na estratégia do plano de produção para o equipamento, foi adotado que o mesmo funciona ininterruptamente vinte e uma horas por dia, sendo seis dias por semana, com cada dispositivo executando sua função uma vez a cada três minutos.

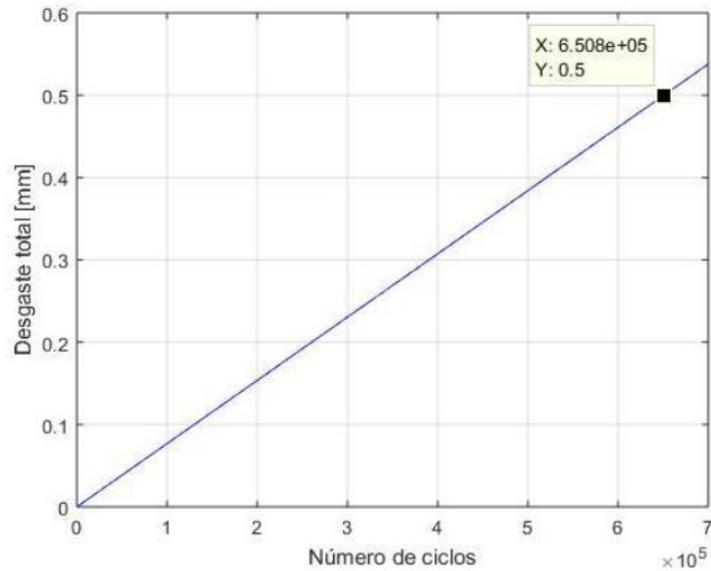
Com isso, obtemos um tempo estimado de uso de 4 anos e 10 meses, conforme mostrado na Figura 62, o que representa um total de $6,508 \times 10^5$ ciclos de acionamento, conforme mostrado na Figura 63.

Figura 62 - Curva de estimativa de vida útil (número de dias) da base do dispositivo desenvolvido em relação ao seu desgaste, considerando um desgaste máximo admissível de meio milímetro



Fonte: O Autor (2020)

Figura 63 - Curva de estimativa de vida útil (número de ciclos) da base do dispositivo desenvolvido em relação ao seu desgaste, considerando um desgaste máximo admissível de meio milímetro



Fonte: O Autor (2020)

5.6 TESTES DOS PROTÓTIPOS EM CAMPO

Os resultados dos testes dos protótipos em campo, dentro do escopo definido no fluxo de ações pela metodologia WCM, serão expostos de forma separada, de acordo com cada fase realizada, conforme listado a seguir.

5.6.1 Análises de Design Higiênico

Em consonância com os preceitos da metodologia WCM, a realização das análises de design higiênico foi conduzida pela equipe de controle de qualidade da Empresa, por meio de inspeção técnica, análise de “*Swab*” ambiental para detecção de coliformes, além de análises de detecção de coliformes no produto acabado. Todos os resultados foram satisfatórios, sendo assim liberado para venda e consumo o Lote do produto de número 131119C, em decorrência do cumprimento de todos os requisitos normativos de segurança de alimentos.

5.6.2 Acompanhamento e Análise de Critérios de Performance e Tempo de Vida Útil

Em consonância com os preceitos da metodologia WCM, os processos de extração e transporte do produto, assim como o processo de entrega do mesmo no envoltório foram acompanhados pela equipe de operação do equipamento durante trinta e nove turnos de trabalho, divididos em dezessete dias. Durante este intervalo de tempo, os dispositivos repetiram estes processos por 5.780 vezes, não apresentando nenhuma falha mecânica, quebra de componentes, ou mesmo mal funcionamento.

Os protótipos com tratamento superficial aplicado não sofreram corrosão ou oxidação em nenhum de seus componentes, porém os protótipos que não possuíam tratamento superficial aplicado apresentaram evidências de corrosão e oxidação em diversos componentes, quatro dias após suas implementações no equipamento. Este fato foi constatado pela equipe de operação, quando da execução do acompanhamento e análise de critérios de performance e tempo de vida útil, sendo estes protótipos substituídos, de forma imediata.

5.6.3 Validação dos Protótipos

Após a validação de todos os resultados referentes às análises gerenciais e de qualidade, testes e acompanhamentos em campo, não foi constatada nenhuma evidência que desabonasse os protótipos desenvolvidos, tendo estes o seu processo de MOC aprovado e validado pela Direção da Unidade Fabril, em consonância com os preceitos da metodologia WCM, sendo assim autorizada a fabricação em lote do dispositivo desenvolvido, em sua versão final.

5.7 TESTES DOS DISPOSITIVOS DESENVOLVIDOS EM CAMPO

Os resultados dos testes dos protótipos em campo, dentro do escopo definido no fluxo de ações pela metodologia WCM, serão expostos de forma separada, de acordo com cada fase realizada, conforme listado a seguir.

5.7.1 Análises de Design Higiênico

Em consonância com os preceitos da metodologia WCM, a realização das análises de design higiênico foi novamente conduzida pela equipe de controle de qualidade da Empresa, por meio de inspeção técnica, análise de “*Swab*” ambiental para detecção de coliformes, além de análises de detecção de coliformes no produto acabado.

Todos os resultados foram satisfatórios, sendo assim liberados para venda e consumo todos os Lotes de variados tipos dos produtos fabricados por meio do equipamento em referência, a partir da trigésima primeira semana de produção do ano (semana a qual foram instalados todos os dispositivos desenvolvidos no equipamento), em decorrência do cumprimento de todos os requisitos normativos de segurança de alimentos.

5.7.2 Acompanhamento e Análise de Critérios de Performance e Tempo de Vida Útil

Em consonância com os preceitos da metodologia WCM, os processos de extração e transporte do produto, assim como o processo de entrega do mesmo no envoltório foram acompanhados equipe de operação do equipamento durante trezentos e vinte e quatro turnos de trabalho, divididos em cento e oito dias. Durante este intervalo de tempo, os dispositivos repetiram estes processos por 45.360 vezes, não apresentando nenhuma falha mecânica, quebra de componentes, ou mesmo mal funcionamento.

Os dispositivos desenvolvidos não sofreram corrosão ou oxidação em nenhum de seus componentes, sendo estes inspecionados a cada sessenta e quatro horas de produção contínua, pela equipe de operação do equipamento.

5.8 APLICAÇÃO DO PROCESSO DE TRATAMENTO TÉRMICO

Os valores de dureza obtidos após a aplicação do processo de tratamento térmico de recozimento nos componentes em formato de chapa do dispositivo de extração desenvolvido foram obtidos a partir da submissão dos mesmos às sequências térmicas de recozimento, sendo gerados os dados listados na Tabela 93.

Tabela 93 - Valores de dureza obtidos após a aplicação do processo de tratamento térmico nos componentes em formato de chapa do dispositivo de extração desenvolvido obtidos a partir da submissão dos mesmos às sequências térmicas de recozimento

Sequência Térmica	Temperatura (°C)	Tempo de Aquecimento (minutos)	Forma de Resfriamento	Tempo de Resfriamento (minutos)	Dureza Média Obtida (HRC)
1	400	20	Forçado (ao ar)	10	46
2	400	20	Forçado (ao ar)	40	46
3	600	20	Forçado (ao ar)	20	48
4	700	20	Forçado (ao ar)	20	44
5	720	20	Forçado (ao ar)	20	42
6	850	20	Natural (dentro do forno)	480	18

Fonte: O Autor (2020)

Os resultados listados na Tabela 93 mostram que temperaturas de aquecimento abaixo de 700 °C não alteraram significativamente a dureza do material já temperado e revenido, e que o resfriamento realizado fora do forno (forçado a ar) é menos eficaz que o resfriamento natural dentro do forno.

Notou-se que o material tem a sua dureza bruscamente reduzida à menos da metade do valor inicial, quando a temperatura de aquecimento ultrapassa os 850 °C.

Foi constatado que existe tendência de ocorrência de fissuras e falhas em amostras onde o sentido de laminação da chapa coincide com o da operação de dobramento, mesmo em amostras que apresentam a mesma dureza, mostrando assim uma fragilidade bidimensional, assim como acontece em aços AHSS (*Advanced High Strength Steels*) de segunda geração, que apresentam excelente comportamento uniaxial e fragilidade excessiva, quando submetidos a um estado biaxial de tensões, o que compromete a estampabilidade (SANGUINETTI, 2021).

Nesse caso, é recomendada a realização das operações de dobramento em sentido perpendicular ao de laminação da chapa.

5.9 INSPEÇÃO POR LÍQUIDO PENETRANTE

Os resultados do ensaio não destrutivo de inspeção por líquido penetrante mostraram que os processos utilizados na fabricação do dispositivo desenvolvido foram satisfatórios, tendo em vista o não aparecimento de trincas, amassamentos, fissuras e falhas na estrutura dos componentes, em nenhuma das amostras aleatórias extraídas dos lotes produzidos.

5.10 APLICAÇÃO DO PROCESSO DE TRATAMENTO SUPERFICIAL

Os resultados da aplicação do processo de tratamento superficial se mostraram satisfatórios, tendo em vista que o protótipo e dispositivo desenvolvido com esta aplicação não sofreram corrosão ou oxidação em nenhum de seus componentes, assim como não houveram indícios e ocorrências de desprendimento de material do processo em relação aos materiais brutos dos componentes.

6 CONCLUSÕES

A organização da estratégia e governança do projeto, seguindo os preceitos da metodologia WCM, proporcionou uma redução de 50% do tempo de execução e implementação desse tipo de projeto (*Advanced Kaizen*).

Os novos materiais empregados proporcionaram expressivos aumentos de resistência mecânica dos componentes dos dispositivos desenvolvidos, que variam de 67% a 85%, aumentos consideráveis dos valores dos respectivos fatores de segurança associados, que variam de 83% a 164%, reduções nos tempos de desgaste, que variam de 41% a 93%, e consequentes aumentos nos tempos de vida útil, que variam de 30% a 650%, quando comparados aos mesmos parâmetros de performance do dispositivo original.

Os redimensionamentos aplicados, dentro do escopo das análises estruturais executadas, ocasionaram aumentos nos valores dos fatores de segurança dos componentes críticos que variam de 50% a 590%.

A aplicação do tratamento térmico de recozimento aos componentes fabricados em Aço Inoxidável AISI 420, proporcionou uma redução média de 60% da dureza Rockwell C, sem ocorrência de fissuras e falhas.

A aplicação do tratamento superficial se mostrou eficaz e satisfatória, tendo em vista que os protótipos e dispositivos de extração desenvolvidos com esta aplicação não sofreram corrosão ou oxidação em nenhum de seus componentes, assim como não houveram indícios e ocorrências de desprendimento de material do tratamento em relação aos materiais brutos, comprovando assim a sua eficiência em termos de aderência.

Os dispositivos desenvolvidos não apresentaram problemas relativos a acionamento, transporte ou extração ineficiente dos picolés a partir dos respectivos moldes e falhas mecânicas, seja durante a realização de testes de funcionamento, seja em operação plena em ambiente fabril, comprovando assim a sua viabilidade e eficiência, mediante toda a tecnologia empregada.

O custo do dispositivo de extração desenvolvido se deu em torno de um terço do custo do dispositivo de extração original, validando a sua viabilidade de implementação, em consonância com os com os preceitos da metodologia WCM.

A melhoria de todos os parâmetros anteriormente citados garante, até o momento, um tempo de substituição (tempo da sistemática para manutenção preventiva) dos dispositivos desenvolvidos duas vezes maior que o tempo de substituição empregado para os dispositivos originais, impactando diretamente o custo associado. Com isso, foi possível avaliar a eficácia do dispositivo de extração desenvolvido em relação ao dispositivo de extração original, mediante toda a tecnologia empregada, em consonância com os com os preceitos da metodologia WCM.

Propostas de Temas para a continuidade da Pesquisa

A pesquisa proporcionou o desenvolvimento de um dispositivo perfeitamente prototipável e testável em campo sob condições reais de usabilidade, possuidor de ótima viabilidade financeira quanto à sua implementação, em consonância com os com os preceitos da metodologia WCM. Com isso, pode-se ser aproveitado todo o escopo deste trabalho.

Como proposta de continuidade deste trabalho são dadas as seguintes sugestões:

- Desenvolver os demais dispositivos de extração integrantes dos equipamentos inseridos no escopo de todo processo de fabricação de picolés de tecnologia “*moldados com palito*” e “*extrudados com palito*”, seguindo a mesma sequência de ações, como premissa da fase de padronização e expansão “*action*”, no âmbito da metodologia WCM;
- Desenvolver outros componentes críticos que sejam caracterizados como pontos fracos das máquinas, seguindo a mesma sequência de ações, como premissa do quarto passo de implementação do Pilar Técnico Manutenção Profissional, em consonância com os com os preceitos da metodologia WCM;
- Fomentar o interesse da comunidade acadêmica por metodologias de produtividade aplicada, tendo em vista as inúmeras possibilidades de implementação de projetos e “*cases*” em Empresas dos mais diversos ramos industriais, e com isso resolver problemas antes tidos como não solucionáveis a curto e médio prazo, assim como também fomentar interesse no âmbito empresarial para a busca de soluções junto à comunidade acadêmica, e com isso consolidar parcerias.

REFERÊNCIAS

- ANTUNES, J. **Sistemas de Produção: Conceitos e Práticas para Projeto e Gestão da Produção Enxuta**. 1ª Ed. Porto Alegre, Editora Bookman, 2008.
- ASHBY, M. F.; JONES, D. R. H. **Engenharia de Materiais**. v. 02. Rio de Janeiro: Elsevier Editora LTDA., 2007.
- ASHBY, M. F. **Materials Selection in Mechanical Design**. Butterworth-Heinemann Led, Oxford, 1995.
- ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P.P. **Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo, Cengage Learning, 2011.
- ASKELAND, D. R.; FULAY, P.P. **Essentials of Materials Science and Engineering**. Second Edition. Toronto, Cengage Learning, 2009.
- ASTM STAINLESS STEEL - Grade Datasheets**, Atlas Steels. Disponível em: http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Atlas_Grade_datasheet_-_all_datasheets_rev_Aug_2013.pdf, acesso em março de 2019.
- CALLISTER, W.D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: uma introdução**. 8ª Ed. Rio de Janeiro, Editora LTC, 2012.
- CHARYYA, A. B.; HAM, I. **Design of Cutting Principles**. Society of Manufacturing Engineers, 2013.
- CHIARINI, A.; VAGNONI, E. **World Class manufacturing by Fiat: Comparison with Toyota production system from a strategic management, management accounting, operations management and performance measurement dimension**. International Journal of Production Research, v. 53, n. 2, p. 590-606, 17 jan. 2015.
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7ª Ed. São Paulo, ABM, 2008.
- CHIAVERINI, V. **Processos de Fabricação e Tratamento – Volume II**. 2ª Ed. São Paulo, Editora McGraw Hill, 1986.

CORTES, P. R. L. **Análise das Relações entre o Processo de Inovação na Engenharia de Produto e as Ferramentas do WCM: Estudo de Caso Em Uma Empresa do Setor Automobilístico.** XXX ENGEPE – Encontro Nacional de Engenharia de Produção. São Paulo. 2010.

COZACIUC, I. **Ensaio de Materiais.** 1ª Ed. Rio de Janeiro, Fundação Roberto Marinho, 2009.

DIGALWAR, A. K.; SANGWAN, K. S. **Development and validation of performance measures for World Class Manufacturing practices in India.** Journal of Advanced Manufacturing Systems, v. 06, n. 01, p. 21–38, 2007.

DOYLE, L. E.; MORRIS, J. L.; LEACH, J. L.; SCHARADER, G. F. **Manufacturing Process and Materials for Engineers.** Prentice-Hall Inc., 1964.

FARIA, A. C. **Redução de Custos sob a ótica da Manufatura Enxuta em Empresa.** Revista Gestão Industrial, pgs. 186-208. Ponta Grossa, 2012.

DE FELICE, F.; PETRILLO, A.; MONFREDA, S. **Operations Management. A improving operations performance with World Class Manufacturing technique: a case in automotive industry.** Roma: Ed. Massimiano M. Schiraldi, 2015.

FARIAS, Maria Cristina Moré, Universidade de Caxias do Sul (UCS) (https://www.ucs.br/site/midia/arquivos/18_04_Palestras_Tribologia_Profa_MCristinaMFarias.pdf), acesso em julho de 2020.

FELICE, F.; PETRILLO, A. **Optimization of manufacturing system through World Class Manufacturing.** International Federation of Automatic Control – IFAC, v. 48, n. 3, p. 741-746. 2015.

FERRARESI, D. **Usinagem de Metais.** Editora Blucher, 2003.

FERREIRA, R.A.S. **Conformação Plástica – Fundamentos Metalúrgicos e Mecânicos.** 2ª Ed. Recife, Editora Universitária UFPE, 2010.

GAJDZIK, B. **World Class Manufacturing in metallurgical enterprise.** Metalurgija, v. 52, n. 1, p. 131-134, mar. 2013.

GRUNING, K. **Técnicas de Conformação.** Editora Polígono, São Paulo, 1973.

HARMSWORTH, C.L. **Fatigue, Tensile and creep Properties of 17-7 ph TH 1050 AM 350 SCT Sheet**, USAF <technical report AFML-TR-69-331> .

HERLACH, D. **Metalurgia Mecânica**. Editora Guanabara Dois, 1976.

KIMINAMI, E. S.; CASTRO, W. B.; OLIVEIRA, M. F. **Introdução aos Processos de Fabricação de Produtos Metálicos**. São Paulo, Editora Blucher, 2015.

JÚNIOR, R. S.; CURI, E. I. Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina (SATC) <http://www.swge.inf.br/ANAIS/CBCM2017/PDF/CBCM2017-0136.pdf>, acesso em julho de 2020.

LEE, H-H. **Finite Element Simulations with ANSYS Workbench**. 14^a Ed. SDC publications, 2014.

Long Products Stainless Steel Grade Sheet – North American Stainless (NAS), Pg. 3, 2013.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2^a Ed. São Paulo, Editora Blucher, 2012.

MIDOR, K. **World Class Manufacturing – characteristics and implementation in an automotive enterprise**. Zeszyty Naukowe / Akademia Morska w Szczecinie, v. 32, p. 42-47, 2012.

MOAVENI, S. **Finite Element Analysis. Theory and Applications with ANSYS**. Ed. Única, São Paulo, Editora Prentice-Hall, 1999.

MOHAMMAD, B. B. S. **Institute of advanced Technology**, Malasya, Atlas Specialty Metals[®], 2014.

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada**. 4^a Ed. Porto Alegre, Editora Bookman, 2013.

NOVICKA, A.; PAPCUN, P.; ZOLOTOVA, I. **Mapping of machine faults using tools of World Class Manufacturing**. In: IEEE 14TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON APPLIED MACHINE INTELLIGENCE AND INFORMATICS (SAMI), 2016, Herlany, Slovakia. Proceedings... Herlany, Slovakia: 2016, p. 223-227.

PADDOCK, B. **Top management's: Guide to world class manufacturing. 1st ed**. Kansas City: Buker, Inc., 1993.

- PALUCHA, K. **World Class Manufacturing model in production management**. Archives of Materials Science and Engineering, v. 58, n. 2, p. 227-234, 2012.
- PERINI, L. A. **Soldagem em Atmosfera Gasosa TIG, MIG e MAG**, Curso de Soldagem, ABM, 1975.
- PETERSON, M. B.; Winer, W. O. “**Wear Coefficients – Metals**”, in **Wear Control Handbook**, 4ª Ed. ASME, New York, 1980.
- ROBERTS, A. D.; LAPIDGE, S. C. **Manufacturing Processes**. McGraw-Hill Co, 1977.
- ROSSI, M. **StamPaggio a Caldo dei Metalli**. Editore Ulrico Hoepli, 1964.
- ROSSI, M. **StamPaggio a Fredoo delle Lamiere**. Editore Ulrico Hoepli, 1973.
- ROSSI, M. **Máquinas, Herramientas Modernas**. Editorial Científico Media, 1965.
- SANTOS, W. C.; NETO, J. O. P., Faculdade de Tecnologia José Creso Gonzales (FATEC) <https://www.scielo.br/pdf/rmat/v20n2/1517-7076-rmat-20-02-00304.pdf>, acesso em julho de 2020.
- SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos Materiais**. 6ª Ed. São Paulo, Editora Pearson Prentice Hall, 2008.
- SAXENA, K. B.; SAHAY, B. **Managing IT for world-class manufacturing: the Indian scenario**. International Journal of Information Management, v. 20, n. 1, p. 29–57, fev. 2000.
- SCHONBERGER, R. **World Class Manufacturing: The Lessons of Simplicity Applied**. New York, NY: Free Press, 1986.
- SHINGO, S. **O Sistema Toyota de Produção do ponto de vista da Engenharia de Produção**. Porto Alegre: Editora Bookman, 1990.
- SOUZA, A. F.; ULBRICH, C. B. L.; **Engenharia Integrada por Computador e Sistemas CAD/CAM/CNC - Princípios e Aplicações**. São Paulo, Artiber Editora LTDA, 2009.
- SHIGLEY, J.E., Mischke, C.R. **Mechanical Engineering Design**, 15ª Ed. Chapter 2, McGraw-Hill, Inc, 1989.
- TELLES, P.C. D. **Materiais Para Equipamentos de Processo**. 6ª Ed. Rio de Janeiro, Editora Interciência, 2003.

VAN VLACK, L. H. **Elements of Materials Science**. Addison-Wesley Publishing Co., 1964.

WOMACK, J. P.; JONES, D.T. **The Machine that changed the world**. New York, NY: Free Press, 1991.

WOMACK, J. P.; JONES, D.T. **Lean Thinking - Banish waste and create wealth in**. New York, NY: Free Press, 1992.

YAMASHINA, H. **Japanese Manufacturing Strategy and the Total Productive Maintenance**. Journal of Quality in Maintenance Engineering, Kyoto University, 1995.

YAMASHINA, H. **Challenge to World Class Manufacturing**. International Journal of Quality of Reliability Management, Kyoto, 2000.

YAMASHINA, H. Artigo “**Introduction to WCM – World Class Manufacturing**”. Kyoto University, Royal Swedish Academy of Engineering Sciences, 2002.

YAMASHINA, H.; KUBO, T. **Manufacturing cost deployment**. International Journal of Production Research, v. 40, n. 16, p. 4077–4091, 2002.

YAMASHINA, H. Artigo “**Technical Pillars**”. Kyoto University, Royal Swedish Academy of Engineering Sciences, 2006.

YAMASHINA, H. **Professional Maintenance Pillar Overview**. International Journal of Quality & Reliability Management, 2014.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; DE MELLO, F. D. H. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo, Editora Blucher, 2013.