



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS

ROBERTO BINDER

DESENVOLVIMENTO DE UM NOVO PROCESSO DE NITRETAÇÃO
POR PLASMA PARA AUMENTO DE PRODUTIVIDADE E
CONFIABILIDADE TRIBOLÓGICA DE COMPONENTES
SINTERIZADOS: ESCALONAMENTO DO LABORATÓRIO À
APLICAÇÃO INDUSTRIAL

FLORIANÓPOLIS/SC

2020

ROBERTO BINDER

Desenvolvimento de um novo processo de nitretação por plasma para aumento de produtividade e confiabilidade tribológica de componentes sinterizados: escalonamento do laboratório à aplicação industrial

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, para a obtenção do grau de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Tecnologia de Plasma Aplicado e Plasma aplicado à Materiais Sinterizados.

Orientador: Prof. Aloisio Nelmo Klein, Dr. Ing.

Co-orientador: Joel Louis Rene Muzart† Dr. Fis †

FLORIANÓPOLIS

2020.

FICHA CATALOGRÁFICA

Binder, Roberto

Desenvolvimento de um novo processo de nitretação por plasma para aumento de produtividade e confiabilidade tribológica de componentes sinterizados: : escalonamento do laboratório à aplicação industrial / Roberto Binder ; orientador, Aloisio Nelmo Klein, 2020.

156 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Ciência e Engenharia de Materiais. 2. Interação Indústria-Universidade, Inovação na Indústria, Impacto Econômico. 3. "Design Thinking", Nitretação por Plasma, . 4. Componentes Sinterizados, Tribologia, . 5. Compressores Herméticos de Refrigeração. . I. Klein, Aloisio Nelmo. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. III. Título.

Roberto Binder

Desenvolvimento de um novo processo de nitretação por plasma para aumento de produtividade e confiabilidade tribológica de componentes sinterizados: escalonamento do laboratório à aplicação industrial

O presente trabalho em nível de doutorado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Aloisio Nelmo Klein, Dr.
Instituição UFSC

Prof. Antonio E. Martinelli, Dr.
Instituição UFRN

Prof. Berend Snoeijer, Dr.
Instituição UFSC

Prof. José Daniel B. De Mello, Dr.
Instituição UFSC

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de doutor em Ciência e Engenharia de Materiais.

Prof. João Batista Rodrigues Neto, Dr.
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Aloisio Nelmo Klein, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2020.

Homenagem em memória do Prof. Joel Louis René Muzart
que deixou este plano existencial em 2005.
Nosso Guru do Plasma.
Grande Professor, pesquisador e amigo.

Via o desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia como meio para a solução
dos problemas da sociedade e entusiasmava seus alunos
com este conceito, que hoje chamamos de Inovação.

À Rose minha querida esposa
Aos meus filhos Luisa, Mateus e Sofia.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido em uma parceria Institucional entre a Nidec-Embraco e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) no Laboratório de Materiais (LabMat) do Departamento de Engenharia Mecânica, através do Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, e agradeço primeiramente a oportunidade e o apoio destas instituições.

Preciso também deixar meus agradecimentos a três grandes Mestres que contribuíram com minha formação técnica e humana desde a minha graduação, os Professores Joel Louis Rene Muzart, Aloisio Nelmo Klein e José Daniel Biasoli de Mello.

A execução desta tese contou com o auxílio e apoio de diversos profissionais tanto no Labmat, quanto na Embraco aos quais expresso meus maiores agradecimentos, sem citá-los, evitando cometer alguma injustiça por falha de memória.

Quero agradecer imensamente meu orientador, Prof. Aloisio Nelmo Klein pela parceria, compartilhamento de conhecimento, ensinamentos e apoio durante a realização deste trabalho.

Um agradecimento muito especial a um dos maiores especialistas em Tecnologia de Plasma do mundo, o Prof. Cristiano Binder, pelo apoio e auxílio na execução desta tese.

Não poderia deixar de trazer meus agradecimentos especiais, à minha esposa Rose e meus filhos Luisa, Mateus e Sofia, pelo apoio e motivação.

“O medo do conhecimento é natural, todos o experimentamos
e não podemos fazer nada a respeito.
Mas por mais difícil que seja o aprendizado, é ainda mais terrível
a ideia de um homem sem conhecimento.”

Don Juan Matus

“Todas as inovações eficazes são surpreendentemente simples. Na verdade, o maior
elogio que uma inovação pode receber é haver quem diga: isto é óbvio.
Por que não pensei nisso antes?”

Peter Drucker

RESUMO

No presente trabalho foi desenvolvido um novo processo de nitretação por plasma para o aumento da confiabilidade tribológica de componentes sinterizados. Este desenvolvimento se baseou na variação das condições de nitretação, principalmente temperatura e mistura gasosa, para obter uma fase de nitretos para a camada de compostos que apresentasse uma maior resistência ao desgaste que a fase atualmente utilizada na nitretação de bielas sinterizadas de compressores herméticos de refrigeração. Além da melhoria da confiabilidade tribológica era premissa essencial reduzir os custos de produção. Os estudos de processamento foram realizados em 3 tipos de equipamentos de nitretação: reator em escala laboratorial, reator em escala piloto e reator em escala industrial, tendo sido utilizadas amostras e componentes reais para os experimentos. Para cada condição de nitretação testada as amostras foram caracterizadas quanto a espessura e fase de nitretos, topografia de superfície e desempenho tribológico, tanto em bancadas de testes (tribômetro), quanto em testes de confiabilidade em produtos (compressores). Como resultado final obteve-se uma nova especificação de camada nitretada, constituída pela Fase γ' com 6,0 μm de espessura, para as bielas de compressores, com maior resistência ao desgaste que a especificação atual. A nova condição de nitretação aumentou a produtividade do reator industrial reduzindo o custo de processamento. Todo o desenvolvimento do trabalho seguiu uma proposta de Processo de Inovação baseado nos conceitos de “Desing Thinking”.

Palavras chaves: Interação Indústria-Universidade, Inovação na Indústria, Impacto Econômico, “Desing Thinking”, Nitretação por Plasma, Componentes Sinterizados, Tribologia, Compressores Herméticos de Refrigeração.

ABSTRACT

In the present work, a new plasma nitriding process was developed to increase the tribological reliability of sintered components. This development was based on the variation of nitriding conditions, mainly temperature and gas mixture, to obtain a nitride phase for the compound layer that presented a higher wear resistance than the phase currently used in the nitriding of sintered connecting rods of hermetic refrigeration compressors. . In addition to improving tribological reliability, it was essential to reduce production costs. The processing studies were carried out in 3 types of nitriding equipment: reactor on laboratory scale, reactor on pilot scale and reactor on industrial scale, using samples and real components for the experiments. For each nitriding condition tested, the samples were characterized as to the thickness and phase of nitrides, surface topography and tribological performance, both in test benches (tribometer) and in product reliability tests (compressors). As a final result, a new nitrated layer was formed, formed by the γ' phase with a thickness of 6.0 μm , for the compressor connecting rods, with greater resistance to wear than the current specification. The new nitriding condition increased the productivity of the industrial reactor, reducing the processing cost. The development of the work followed a proposal for an Innovation Process based on the concepts of “Desing Thinking”.

Keywords: Industry-University Interaction, Industry Innovation, Economic Impact, “Desing Thinking”, Plasma Nitriding, Sintered Components, Tribology, Hermetic Refrigeration Compressors.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.1- Reator de nitretação laboratorial para estudos fundamentais.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 1.2 – Reator piloto de nitretação por plasma semi-industrial.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 1.3 - Reator piloto, em escala industrial, com extração de óleo e nitretação por plasma em ciclo único, com capacidade de 10.000 bielas.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura1.4 – Célula de nitretação com o conceito Duplex.</i>	<i>23</i>
<i>Figura1.5 – Visualização da Célula Duplex de Limpeza e Nitretação por Plasma em Ciclo único.</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2.1 - As 12 dimensões da Inovação</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2.2 – Definição abrangente de Inovação.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 2.3 – Fatores que associados produzem uma solução inovadora</i>	<i>28</i>
<i>Figura 2.4 – Ações associadas à execução desta tese.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 4.1 - Métodos de corte e extração de gelo de rios e lagos, no século XIX.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 4.2 - Ice houses construídas nos Estados Unidos (a) e no Irã (b).</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4.3 - Esquema da máquina de refrigeração inventada por Perkins.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4.4 - Máquina de refrigeração construída por Harrison.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4.5 - Detalhe de um dos primeiros refrigeradores domésticos com unidades seladas produzidos no mundo. Monitor Top.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4.6 – Ciclo padrão de refrigeração por compressão mecânica de vapores</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.7 - Distribuição do consumo de energia elétrica residencial no Brasil (EPE, 2014)</i>	<i>41</i>
<i>Figura 4.8– Distribuição da energia elétrica consumida no Brasil por setor (EPE, 2013)</i>	<i>42</i>
<i>Figura 4.9 – Tipos de compressores de refrigeração quanto ao princípio de compressão.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 4.10 – Subclassificação dos compressores alternativos.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4.11- Diagrama funcional de um compressor hermético.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 4.12 – Vista explodida de um compressor hermético típico.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4.13 – Kit mecânico de compressor hermético: pares tribológicos</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4.14 – Ciclo de produção clássico da metalurgia do pó.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4.15 - Curva característica corrente-tensão dos regimes de descarga elétrica.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4.16 - Distribuição de potencial elétrico</i>	<i>58</i>
<i>Figura 4.17 - Diagrama de equilíbrio Fe-N</i>	<i>60</i>
<i>Figura 4.18 - Formação e cinética de crescimento da camada nitretada</i>	<i>62</i>
<i>Figura 4.19 - Topografia da superfície original; (a) via MEV; (b) por interferometria a laser.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 4.20 - Topografia da superfície nitretada da amostra γ'; (a) via MEV; (b) por interferometria a laser</i>	<i>68</i>
<i>Figura 4.21 - Topografia da superfície nitretada da amostra ϵ; (a) via MEV; (b) por interferometria a laser.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 4.22 - Parâmetros que caracterizam a superfície nitretada nas condições TN-G (γ') e TN-E (ϵ)</i>	<i>69</i>
<i>Figura 4.23 - Evolução de S_q para cada camada ao longo do processo</i>	<i>69</i>
<i>Figura 4.24 – Coeficiente de atrito e potencial de contato médio das amostras TN-G (γ') e TN-E (ϵ).....</i>	<i>70</i>

<i>Figura 4.25 – Volume desgaste médio das amostras TN-G (γ') e TN-E (ϵ)</i>	71
<i>Figura 4.26 – Volume desgaste do contra corpo (esfera) TN-G (γ') e TN-E (ϵ)</i>	71
<i>Figura 4.27 – Taxa de desgaste das amostras SAMPLE-G (γ') e SAMPLE-E (ϵ)</i>	72
<i>Figura 4.28 – Taxa de desgaste do contra corpo (esfera) SAMPLE-G (γ') e SAMPLE-E (ϵ)</i>	72
<i>Figura 4.29 – Fluxo do processo atual para fabricação de bielas.</i>	73
<i>Figura 5.1 – Fluxo do processo atual destacando em azul as alterações pretendidas neste trabalho</i>	74
<i>Figura 5.2- Visão operacional dos ciclos de nitretação a plasma.</i>	77
<i>Figura 6.1 – Componentes a serem utilizados</i>	79
<i>Figura 6.2 – Esquema construtivo dos reatores de nitretação</i>	80
<i>Figura 6.3 - (a) Esquema dos testes de deslizamento alternado, (b) Esquema do volume do segmento esférico usado para calcular o volume desgastado do contra-corpo.</i>	83
<i>Figura 6.4 – Bancadas para testes de confiabilidade de compressores</i>	84
<i>Figura 7.1 - Montagem das amostras no suporte do reator de nitretação</i>	86
<i>Figura 7.2 - Imagens representativas da camada obtida em cada ciclo.</i>	87
<i>Figura 7.3 - Difratogramas de DRX das camadas em cada ciclo</i>	89
<i>Figura 7.4 - Difratogramas de DRX mostrando as principais posições dos picos da fase Épsilon</i>	90
<i>Figura 7.5 - Montagem utilizada para nitretação dos olhais</i>	91
<i>Figura 7.6 – Imagens representativas da camada obtida em cada ciclo.</i>	92
<i>Figura 7.7 – Camada subsuperficial - Braunita</i>	94
<i>Figura 7.8 - Imagem representativas da camada obtida no Ciclo 9.</i>	96
<i>Figura 7.9- Microestrutura das camadas nitretadas de (a) Nitretação Colunar, (b) Nitretação Braunita, (c) Nitretação Livre de Defeitos</i>	99
<i>Figura 7.10 – Difração de RAIO-X das camadas obtidas.</i>	101
<i>Figura 7.11 - Nitretação Braunita: (a) topografia de superfície SEM, (b) projeção axonométrica da superfície.</i> 102	
<i>Figura 7.12 – Taxa de desgaste nas camadas nitretadas e seus contra-corpos</i>	103
<i>Figura 7.13 - Marcas de desgaste das camadas após os testes de deslizamento alternativo obtidos por interferometria de luz branca.</i>	104
<i>Figura 7.14 - (a) Variação do coeficiente de atrito ao longo do teste, (b) coeficiente de atrito</i>	105
<i>Figura 7.15 - Imagens MEV das marcas de desgaste:</i>	107
<i>Figura 8.1 - Sequência das etapas de processamento e caracterização para a Fase de Desenvolvimento de Produto.</i>	109
<i>Figura 8.2 - Montagem das bielas no suporte do reator piloto.</i>	110
<i>Figura 8.3 – Regiões de medição das camadas.</i>	111
<i>Figura 8.4 – Microestruturas das camadas obtidas nas duas condições de nitretação.</i>	113
<i>Figura 8.5 – Espectro de Raio - X</i>	114
<i>Figura 8.6 – Configurações de camadas nitretadas para ranqueamento.</i>	115
<i>Figura 8.7 – Condições nitretadas nos fornecedores</i>	117
<i>Figura 8.8 - Condições nitretadas no Labmat.</i>	118

<i>Figura 8.9 – Espessuras de camada nitretada nas diferentes condições de nitretação.</i>	<i>119</i>
<i>Figura 8.10 – Fases de nitretos presentes na camadas nitretadas dos fornecedores.</i>	<i>120</i>
<i>Figura 8.11 - Fases de nitretos presentes na camadas nitretadas no Labmat.</i>	<i>120</i>
<i>Figura 8.12 - Rugosidade média quadrática (Sq).</i>	<i>121</i>
<i>Figura 8.13 - Coeficiente de atrito do ranqueamento tribológico.</i>	<i>122</i>
<i>Figura 8.14 – Taxa de desgaste nos olhais nitretados – CORPO.</i>	<i>122</i>
<i>Figura 8.15 - Taxa de desgaste nas esferas – CONTRA CORPO.</i>	<i>123</i>
<i>Figura 8.16 - Taxa de desgaste CORPO – CONTRA CORPO.</i>	<i>124</i>
<i>Figura 9.1 – Reator industrial instalado no LabMat.</i>	<i>132</i>
<i>Figura 9.2 – Comparação entre os suportes de peças.</i>	<i>133</i>
<i>Figura 9.3 – Suporte de peças montado no reator</i>	<i>133</i>
<i>Figura 9.4 - Esquema de distribuição da carga de peças no equipamento: (a) regiões em que foram retiradas peças para análise no sentido longitudinal da carga, ou seja, entre bandejas do suporte; (b) regiões em que foram retiradas peças para análise no sentido radial da carga, ou seja, na bandeja do suporte.</i>	<i>135</i>
<i>Figura 9.5 -Regiões da peça em que foi determinada a espessura da camada de compostos:</i>	<i>135</i>
<i>Figura 9.6 - Micrografia da camada de compostos nas 3 diferentes regiões de análise da peça</i>	<i>138</i>
<i>Figura 9.7 - Valor médio da espessura da camada branca dos 3 ciclos de nitretação com carga completa.</i>	<i>139</i>
<i>Figura 9.8 - Espectro de raio-X típico das amostras nitretadas durante os experimentos de carga completa ...</i>	<i>140</i>
<i>Figura 10.1 Síntese dos resultados da tese.</i>	<i>148</i>
<i>Figura 10.2 – Cumprimento das etapas do Processos de Inovação.</i>	<i>149</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 4.1 — Pares tribológicos x lubrificação e risco de falha.</i>	51
<i>Tabela 4.2 - Fases do sistema Fe-N abaixo da temperatura eutetóide.</i>	61
<i>Tabela 7.1 - Parâmetros utilizados na sinterização</i>	85
<i>Tabela 7.2 - Denominação dos ciclos</i>	86
<i>Tabela 7.3 - Parâmetros de nitretação</i>	86
<i>Tabela 7.4 – Resultados das espessuras das camadas nitretadas</i>	88
<i>Tabela 7.5 Condições de nitretação estabelecidas para os olhais.</i>	91
<i>Tabela 7.6 – Espessura das camadas considerando centro e borda.</i>	93
<i>Tabela 7.7 - Espessura média das camadas obtidas</i>	93
<i>Tabela 7.8 – Ciclos para eliminação da Braunita</i>	95
<i>Tabela 7.9 - Espessura das camadas considerando centro e borda</i>	96
<i>Tabela 7.10 - Espessura média das camadas obtidas em 3 réplicas do Ciclo 9.</i>	96
<i>Tabela 7.11 - Parâmetros de nitretação de plasma</i>	99
<i>Tabela 7.12 – Espessura das Camadas obtidas nos três ciclos de nitretação</i>	100
<i>Tabela 7.13 - Parâmetro topográfico S_q (rugosidade média quadrática) dos espécimes avaliados</i>	102
<i>Tabela 8.1 - Condições de nitretação</i>	110
<i>Tabela 8.2 – Espessura de camada Condição Fase γ'</i>	111
<i>Tabela 8.3 - Espessura de camada branca Condição Fase γ'-Oxinitretada</i>	112
<i>Tabela 8.4 - Espessura de camada oxinitretada Condição Fase γ'-Oxinitretada</i>	112
<i>Tabela 8.5 - Configurações de camadas nitretadas para ranqueamento.</i>	116
<i>Tabela 8.6 - Modelo do compressor, da biela, condições de teste e quantidades</i>	125
<i>Tabela 8.7 - Fatores a serem avaliados nos testes de desgaste.</i>	126
<i>Tabela 8.8 – Configurações montadas em compressores</i>	126
<i>Tabela 8.9 – Avaliações específicas entre as configurações</i>	127
<i>Tabela 8.10- Resultados dos testes de desgaste de 500 h em compressores</i>	128
<i>Tabela 8.11 – Conclusões com relação às avaliações específicas entre as configurações</i>	129
<i>Tabela 9.1 – Espessura da camada branca e gradiente térmico ao longo da Carga 1 de 7.000 peças.</i>	137
<i>Tabela 9.2 – Espessura da camada branca e gradiente térmico ao longo da carga 2 de 7.000 peças.</i>	137
<i>Tabela 9.3 – Espessura da camada branca e gradiente térmico ao longo da carga 3 de 7.000 peças.</i>	138
<i>Tabela 9.4 - Descrição das variáveis de custos.</i>	141
<i>Tabela 9.5 – Ganhos de produtividade no reator de nitretação</i>	142
<i>Tabela 9.6 – Ganhos econômicos com a adoção da especificação com fase γ',</i>	142

SUMÁRIO

RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XIII
SUMÁRIO	XIV
1 PARCERIA UNIVERSIDADE – INDÚSTRIA: DA CIÊNCIA À INOVAÇÃO.	18
1.1 A PARCERIA EMBRACO – LABMAT/UFSC.....	18
1.2 HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DA NITRETAÇÃO POR PLASMA DE BIELAS SINTERIZADAS PARA COMPRESSORES HERMÉTICOS.	20
2 INOVAÇÃO	25
2.1 CONCEITO DE INOVAÇÃO.....	25
2.2 PROCESSO DE INOVAÇÃO	27
3 INTRODUÇÃO	30
3.1 IDENTIFICAÇÃO DOS PROBLEMAS A SEREM RESOLVIDOS.....	30
3.2 OBJETIVOS.....	32
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	34
4.1 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO.	34
4.1.1 <i>UMA BREVE HISTÓRIA DA REFRIGERAÇÃO NO MUNDO. (MACAGNAN, 2018)</i>	34
4.1.2 <i>APLICAÇÕES DA REFRIGERAÇÃO. (THIESSEN, 2009)</i>	39
4.1.3 <i>REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO MECÂNICA DO VAPOR. (GONÇALVES, 2004)</i>	40
4.1.4 <i>CONTEXTO SÓCIO-ECONÔMICO.</i>	41
4.2 COMPRESSORES DE REFRIGERAÇÃO.	43
4.2.1 <i>INTRODUÇÃO.</i>	43
4.2.2 <i>COMPRESSORES HERMÉTICOS ALTERNATIVOS.</i>	45
4.2.3 <i>COMPRESSOR HERMÉTICO ALTERNATIVO EM DETALHES.</i>	46
4.2.4 <i>MANCAIS EM COMPRESSORES HERMÉTICOS DE REFRIGERAÇÃO.</i>	49
4.2.4.1 <i>Lubrificação em compressores herméticos.</i>	49
4.2.4.2 <i>Classificação dos pares tribológicos quanto ao tipo de lubrificação.</i>	51
4.3 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE BIELAS PARA COMPRESSORES HERMÉTICOS.	52
4.3.1 <i>METALURGIA DO PÓ.</i>	52
4.3.1.1 <i>Etapas do processo de fabricação de componentes sinterizados.</i>	53
4.3.2 <i>TECNOLOGIA DE PLASMA APLICADA EM MATERIAIS</i>	56
4.3.2.1 <i>Descargas elétricas.</i>	56

4.3.2.2	Descarga elétrica no regime anormal	57
4.3.3	NITRETAÇÃO POR PLASMA	58
4.3.3.1	Diagrama de Fases Fe-N.....	60
4.3.3.2	Mecanismo do Processo de Nitretação por Plasma.....	62
4.3.3.3	Endurecimento superficial	63
4.3.3.4	Mecanismos de endurecimento por plasma.....	63
4.3.3.5	Estrutura da Camada Nitretada	65
4.4	TOPOGRAFIA E TRIBOLOGIA DE CAMADAS NITRETADAS	67
4.4.1	TOPOGRAFIA DE CAMADAS NITRETADAS COM FASES ϵ e γ	67
4.4.2	RESISTÊNCIA AO DESGASTE, EM TRIBÔMETRO, DAS FASES ϵ E γ	70
4.5	FLUXO DE FABRICAÇÃO DE BIELAS PARA COMPRESSORES HERMÉTICOS	73
5	PROPOSTA E METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO	74
6	MATERIAIS E PROCEDIMENTOS	79
6.1	AMOSTRAS E COMPONENTES	79
6.2	REATORES DE NITRETAÇÃO.....	79
6.3	METODOLOGIA DE CARACTERIZAÇÃO	80
6.3.1	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL	80
6.3.1.1	Preparação metalográfica.....	80
6.3.1.2	Microscopia óptica.....	81
6.3.1.3	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	81
6.3.1.4	Difratometria de raios-x.....	81
6.3.2	CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA	82
6.3.3	CARACTERIZAÇÃO TRIBOLÓGICA	82
6.3.4	CARACTERIZAÇÃO DIMENSIONAL	83
6.3.5	TESTES DE CONFIABILIDADE TRIBOLÓGICA EM COMPRESSORES HERMÉTICOS	83
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES: ESCALA LABORATÓRIAL	85
7.1	ESTUDO DA FORMAÇÃO DA FASE Fe_4N (r').....	85
7.1.1	ETAPA PRELIMINAR: NITRETAÇÃO DE AMOSTRAS	85
7.1.1.1	Fabricação das amostras.....	85
7.1.1.2	Nitretação das amostras.....	85
7.1.1.3	Caracterização microestrutural das amostras.....	86
7.1.1.4	Caracterização das fases de nitretos das amostras.....	88
7.1.2	CONCLUSÕES	90
7.1.3	ETAPA PRELIMINAR: NITRETAÇÃO DE OLHAIS	90
7.1.3.1	Nitretação dos Olhais.....	91
7.1.3.2	Caracterização microestrutural das amostras.....	92
7.1.3.3	Conclusões parciais.....	93

7.1.3.4	Nitretação dos Olhais para eliminação da Braunita.....	95
7.1.4	<i>CONCLUSÕES FINAIS</i>	97
7.2	O EFEITO DO CÁTODO OCO SOBRE O COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DAS CAMADAS NITRETADAS POR PLASMA.....	97
7.2.1	<i>OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS</i>	98
7.2.2	<i>CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL</i>	99
7.2.3	<i>CARACTERIZAÇÃO DAS FASES DE NITRETOS</i>	100
7.2.4	<i>CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA</i>	101
7.2.5	<i>CARACTERIZAÇÃO TRIBOLÓGICA</i>	103
7.2.6	<i>CONCLUSÕES SOBRE O EFEITO DO CÁTODO OCO</i>	107
8	RESULTADOS E DISCUSSÕES: FASE DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO	109
8.1	NITRETAÇÃO DAS BIELAS NO REATOR PILOTO.....	110
8.1.1	<i>CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL</i>	111
8.1.2	<i>CONCLUSÕES</i>	114
8.2	DESEMPENHO TRIBOLOGICO.....	115
8.2.1	<i>DESEMPENHO TRIBOLOGICO EM TRIBOMETRO</i>	115
8.2.1.1	DESCRIÇÃO DOS TESTES.....	115
8.2.1.2	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL.....	116
8.2.1.3	CARACTERIZAÇÃO DAS FASES DE NITRETOS.....	120
8.2.1.4	CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA.....	121
8.2.1.5	RESULTADOS DO RANQUEAMENTO EM TRIBÔMETRO.....	121
8.2.2	<i>DESEMPENHO TRIBOLÓGICO EM COMPRESSORES</i>	125
8.2.2.1	DESCRIÇÃO DOS TESTES.....	125
8.2.2.2	RESULTADOS DOS TESTES EM COMPRESSOR.....	127
8.3	CONCLUSÕES.....	130
9	RESULTADOS E DISCUSSÕES: FASE DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO	131
9.1	DESCRIÇÃO DO REATOR.....	131
9.2	DESCRIÇÃO DOS TESTES.....	134
9.3	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL.....	136
9.3.1	<i>RESULTADOS DA ESPESSURA DE CAMADA BRANCA</i>	136
9.3.2	<i>CARACTERIZAÇÃO DAS FASES DE NITRETOS DAS CAMADAS NITRETADAS</i>	139
9.4	AVALIAÇÃO ECONÔMICA NA ESCALA INDUSTRIAL.....	141
9.5	CONCLUSÕES.....	143
10	SÍNTESE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES	144
10.1	RESULTADOS E CONCLUSÕES: FASE LABORATORIAL.....	144
10.2	RESULTADOS E CONCLUSÕES: FASE DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO.....	146
10.3	RESULTADOS E CONCLUSÕES FASE DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO.....	147

11	PRODUÇÃO CIENTÍFICA RELACIONADA À TESE.....	150
11.1	PATENTES CONCEDIDAS.....	150
11.2	ARTIGOS PUBLICADOS.....	150
11.3	CAPÍTULO EM LIVRO.....	151
12	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	152
13	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153

1 PARCERIA UNIVERSIDADE – INDÚSTRIA: DA CIÊNCIA À INOVAÇÃO.

1.1 A PARCERIA EMBRACO – LABMAT/UFSC

O presente trabalho faz parte de um desenvolvimento mais abrangente que vem sendo desenvolvido pela EMBRACO em parceria com o Laboratório de Materiais (LabMat) da UFSC. A EMBRACO foi fundada em Joinville/SC em 1971 e começou a produzir compressores herméticos em 1974, com o objetivo inicial de suprir a indústria brasileira de refrigeradores, então dependente da importação de compressores. Nesta mesma década tornou-se exportadora e, na década seguinte, seus produtos já eram comercializados em todos os continentes. Nos primeiros anos de 1990, antecipando-se à globalização da economia, a EMBRACO deu início ao processo de abertura de bases produtivas fora do Brasil e a consequente ampliação de sua estrutura global de vendas. Logo chegou à liderança mundial, com uma participação no mercado (market share) atualmente estimado em 20%. Ao aliar o talento de seus profissionais a investimentos permanentes em tecnologia, consolidou-se como fornecedora de excelência, fazendo com seus produtos se tornassem os preferidos de grandes montadoras de eletrodomésticos e de destacados fabricantes de equipamentos para refrigeração comercial.

Especializada em soluções para refrigeração e líder mundial do mercado de compressores herméticos, a EMBRACO tem como missão "Desenvolver eletrodomésticos essenciais transformando o dia-a-dia das pessoas em experiências mais saudáveis e confortáveis". Com fábricas no Brasil, China, México e Eslováquia e com capacidade de produção de quase 40 milhões de compressores ao ano, a EMBRACO produz também componentes de ferro fundido, componentes elétricos, condensadores e evaporados, que são utilizados na montagem de unidades condensadoras e seladas.

A missão da Área de Pesquisa e Desenvolvimento (R&D) é disponibilizar tecnologias e viabilizar projetos simples e robustos de produtos e processos ecologicamente corretos, através da utilização de times focados na inovação, agilidade e suporte técnico, para garantir a permanente rentabilidade do negócio, confiança dos clientes e liderança no mercado.

O desenvolvimento de novas tecnologias garante que os produtos fabricados pela EMBRACO estejam sempre presentes junto à indústria de refrigeração de maior desempenho.

O reconhecimento internacional do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da EMBRACO pode ser atestado pelas 1100 cartas-patentes já obtidas pela organização, em âmbito mundial.

Como uma das estratégias para garantia da liderança tecnológica a EMBRACO mantém acordos de cooperação técnica com reconhecidos laboratórios de universidades e centros de pesquisa, formando uma rede cujo objetivo é a inovação e a melhoria contínua de seus produtos.

Em 1982 foi estabelecido o primeiro acordo com a Universidade Federal de Santa Catarina, o qual foi renovado ininterruptamente ao longo dos últimos 36 anos.

Um dos Grupos de Pesquisa da UFSC parceiro da Embraco é o Laboratório de Materiais, LabMat, do Departamento de Engenharia Mecânica, com o qual desenvolve, ao longo dos últimos 30 anos, uma série de linhas de Pesquisa nas Áreas de Metalurgia do Pó, Tratamentos Superficiais por Plasma, Tribologia, Materiais Magnéticos, Nanotecnologia e Técnicas de Caracterização de Materiais e Componentes.

O LabMat - UFSC possui mais de 30 anos de experiência nas áreas de metalurgia do pó e de tribologia, além de 25 anos de experiência em processos assistidos por plasma e 10 anos em pesquisa com nanomateriais. A abordagem multidisciplinar e a convergência destas áreas de conhecimento que se complementam sinergicamente num mesmo grupo de pesquisa, que atua desde a pesquisa básica até a solução industrial, fazem com que o LabMat seja capaz de gerar inovações de grande relevância não apenas científica, mas também com elevado valor de mercado. Prova disso é seu portfólio de 20 patentes de novos processos, novos materiais e produtos relacionados à tecnologia do pó, processos assistidos a plasma, engenharia de superfície e produção de nanopartículas, que juntas somam 111 pedidos de depósito em 11 países.

Todos os projetos de Desenvolvimento Tecnológico da Embraco, em parceria com o LabMat, estão alinhados com o Planejamento Estratégico Tecnológico da empresa que incorpora elementos mercadológicos, o estágio de evolução tecnológica da empresa e a relevância das várias opções tecnológicas em um horizonte de 10 anos.

Logo, tem-se a transformação da invenção em inovação (valor comercial), através de um processo direcionado e sistêmico, que define os Direcionadores dos projetos de Pesquisa da parceria.

Os grandes desafios para o desenvolvimento de soluções de materiais a serem aplicados na fabricação de compressores herméticos devem atender algumas premissas mandatórias:

- Devem ser exequíveis em processos de fabricação de alta produtividade.
- Devem apresentar altíssima confiabilidade (um compressor deve funcionar no mínimo 10 anos, sem perda de eficiência e sem manutenção).
- Devem apresentar baixo custo.
- Deve-se deter completo domínio tecnológico da solução adotada, através de técnicas de caracterização e controle de qualidade.
- Deve apresentar estabilidade termodinâmica e compatibilidade química em contato com os demais componentes do sistema em condições de operação.
- Devem ser sustentáveis, reduzindo os impactos ambientais em seu processamento e aplicação.

Assim, o desenvolvimento de materiais e sua aplicação em compressores, devem ser conduzidos com uma abordagem multidisciplinar, integrando especialistas em materiais, produtos e processos considerando os objetivos finais do projeto.

1.2 HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DA NITRETAÇÃO POR PLASMA DE BIELAS SINTERIZADAS PARA COMPRESSORES HERMÉTICOS.

Todos os compressores herméticos fabricados pela EMBRACO, para aplicações domésticas e comerciais leves utilizam bielas fabricadas pelo processo de Metalurgia do Pó (sinterização), pelas suas características de produtividade, repetibilidade, controle dimensional e baixo custo. Após a sinterização e calibração, as bielas são submetidas aos tratamentos termoquímicos de oxidação a vapor (ferroxidação) ou nitretação por plasma para garantir as propriedades de resistência ao desgaste destes componentes.

Os compressores de maior eficiência energética utilizam óleos de lubrificação de baixa viscosidade e neste caso, todas as bielas são nitretadas por plasma. Atualmente representa um volume em torno de 22 milhões de unidades por ano.

O início da utilização da tecnologia de nitretação por plasma, pela EMBRACO, consistiu na implantação de reatores importados na linha de produção do fabricante de bielas nitretadas.

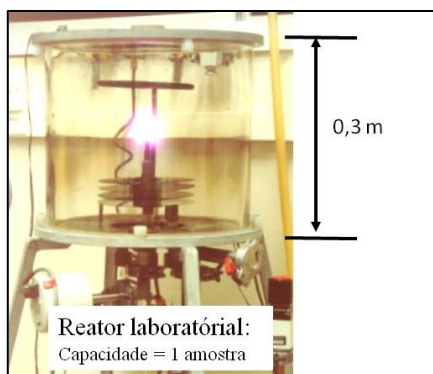
O alto custo destes equipamentos importados sempre impactou em um custo elevado por componente. A busca de independência tecnológica por parte da empresa, levou à criação de linha de pesquisa com a equipe de Plasma do LabMat, que vinha estudando este processo a alguns anos.

Esta linha de pesquisa tinha como meta o desenvolvimento de uma nova tecnologia de nitretação por plasma, garantindo o domínio de todos os aspectos científicos e tecnológicos que permitissem a concepção e produção de um equipamento industrial de menor porte, maior produtividade, maior estabilidade e repetibilidade e que demandasse um investimento menor, garantindo uma redução de custos por componente.

A evolução desta linha de pesquisa é resumida a seguir.

- **1986:** Início da linha de pesquisa em processamento de materiais por plasma na UFSC em parceria com Embraco. A figura 1.1 mostra um típico reator laboratorial.

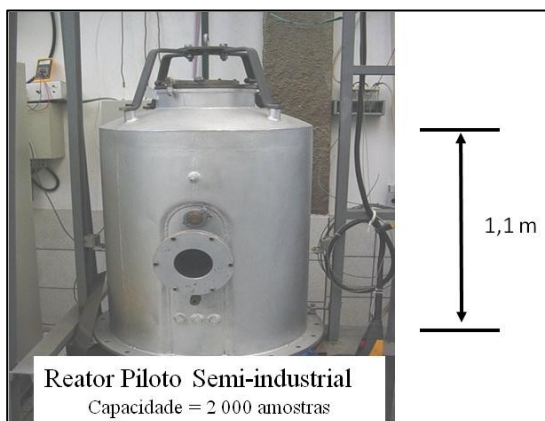
Figura 1.1- Reator de nitretação laboratorial para estudos fundamentais



Fonte: Autoria própria.

- **1992 a 1996:** Domínio da tecnologia de nitretação por plasma em peças sinterizadas e construção do primeiro reator piloto semi-industrial (figura 1.2).

Figura 1.2 – Reator piloto de nitretação por plasma semi-industrial.



Fonte: Autoria própria.

- **2000 - 2001:** Dissertação explorando a extração de óleo de materiais porosos via plasma. Patente nacional do processo. (Patente PIO105593-3 B1)
- **2003 a 2004:** Desenvolvido processo, em escala industrial, de extração de óleo e nitretação por plasma em ciclo único utilizando o Reator piloto do Labmat (Reator + Processo). Reator piloto em escala industrial pode ser visto na figura 1.3.

Figura 1.3 - Reator piloto, em escala industrial, com extração de óleo e nitretação por plasma em ciclo único, com capacidade de 10.000 bielas



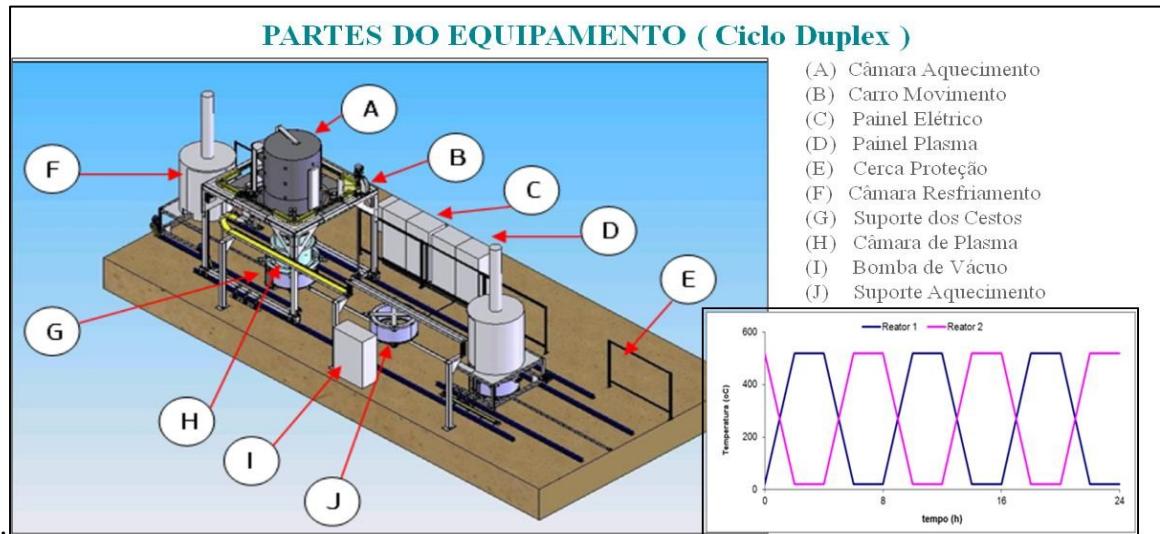
Fonte: Autoria própria.

- **2005 a 2006:** Projeto para uma Célula de Nitretação de Bielas com capacidade para 7 milhões de bielas por ano (figura 1.4).

Resultados:

- Patente do Reator de Plasma). (P10803774-4 A2)
- Custo do equipamento: 3,6 vezes menor que equipamento comercial.
- Redução de custo: Custo por peça 80% menor que solução comercial atual.

Figura 1.4 – Célula de nitretação com o conceito Duplex.

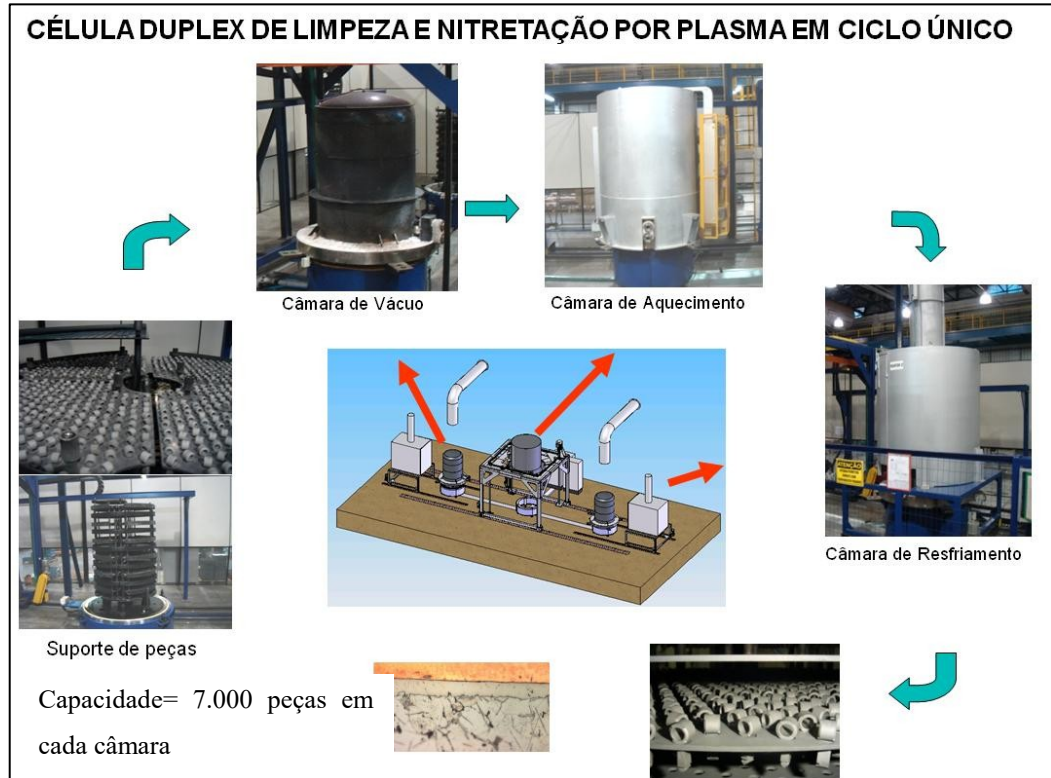


Fonte: Autoria própria.

- 2007 a 2008:** Transferência da tecnologia de nitretação para fornecedor.

Após avaliação das potencialidades da solução para a Célula de nitretação Duplex, decidiu-se por transferir a tecnologia para o segundo grande fornecedor de bielas da Embraco, que não dispunha do processo de nitretação. A figura 1.5 mostra esquematicamente o equipamento construído, que já produziu em torno de 80 milhões de componentes.

Figura 1.5 – Visualização da Célula Duplex de Limpeza e Nitretação por Plasma em Ciclo Único.



Fonte: Autoria própria.

Após 20 anos de pesquisa sistemática a partir de estudos fundamentais da Física de Plasma, Engenharia de Materiais, Projeto e Patente de Equipamentos, chegou-se a uma solução **inovadora**, ou seja, aplicada no mercado com ganhos financeiros.

2 INOVAÇÃO

O termo “inovação” provavelmente seja uma das palavras mais utilizadas na atualidade em todos os meios de comunicação, possuindo os mais diversos conceitos e contextos de aplicação.

Neste capítulo sintetizamos os conceitos e aplicação da Inovação.

2.1 CONCEITO DE INOVAÇÃO

O termo “inovação” talvez seja uma das palavras mais utilizadas nos dias de hoje, praticamente se tornando um chavão. Mas o que significa efetivamente inovar? Ou apresentar uma solução inovadora?

A definição de Inovação não é exata e vários teóricos da Administração apresentam as suas. A título de ilustração cita-se algumas:

- **Peter Drucker:** *"Inovação é o ato de atribuir novas capacidades aos recursos (pessoas e processos) existentes na empresa para gerar riqueza".* (OLIVEIRA)
- **Ernest Gundling:** *"Inovação é uma nova ideia implementada com sucesso, que produz resultados econômicos".* (OLIVEIRA)
- **C.K. Prahalad:** *"Inovação é adotar novas tecnologias que permitem aumentar a competitividade da companhia".* (OLIVEIRA)
- **Jürgen Hauschildt:** *"inovações são produtos, serviços, processos ou modelos de negócios qualitativamente novos que se diferem visivelmente em um estado comparativo".* (MJV Team, 2020)

A inovação também pode ser dividida em diferentes tipos como, por exemplo:

- Inovação de desempenho.
- Inovação incremental.
- Inovação radical.
- Inovação sustentável.
- Inovação disruptiva.
- Inovação aberta.
- Inovação ágil.

É comum, também, associar-se a inovação à introdução de alguma nova tecnologia que viabilizou um novo produto ou serviço. Isso acontece e talvez seja a forma mais perceptível, mas há outras formas de inovar em um negócio.

Sawhney, Wolcott e Arroniz (Mohanbir Sawhney, 2006) desenvolveram uma ferramenta bem interessante chamada de **Radar da Inovação**. O Radar apresenta 12 dimensões possíveis de se inovar em um negócio. A figura 2.1 ilustra as 12 dimensões da inovação.

Figura 2.1 - As 12 dimensões da Inovação



Fonte: (Mohanbir Sawhney, 2006)

Considerando estas 12 dimensões possíveis para a inovação em um negócio, vê-se quão abrangente são as oportunidades para obter-se a inovação, sendo o lançamento de um novo produto tecnológico, (SOLUÇÃO, na figura 2.2) apenas uma delas.

Sendo assim preferimos adotar a definição de Inovação de Ernest Gundling: **"Inovação é uma nova ideia implementada com sucesso, que produz resultados econômicos"**.

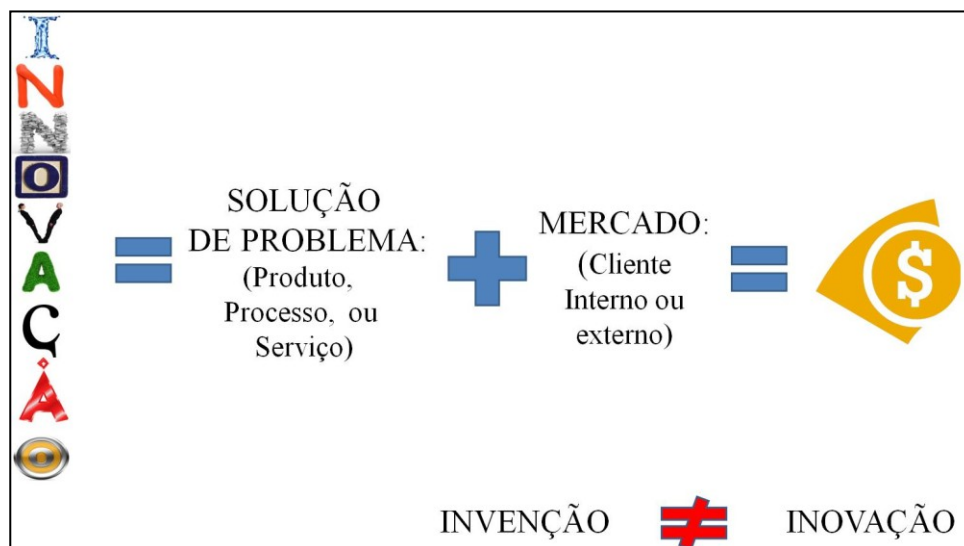
Mas, independente de qual definição queira-se adotar, todas concordam no ponto mais importante: seja qual for o tipo de mudança introduzida, ela só será uma INOVAÇÃO se trouxer resultados econômicos positivos ao negócio em algum ponto da Cadeia Produtiva.

Vale também destacar outra confusão de conceitos no universo da inovação. Comumente aplica-se o termo INVENÇÃO como sinônimo de INOVAÇÃO, o que não é

correto, pois se um invento não for introduzido dentro da Cadeia Produtiva gerando resultados econômicos positivos ao negócio, ele não é inovativo.

A imagem da figura 2.2 sintetiza o conceito de inovação.

Figura 2.2 – Definição abrangente de Inovação



Fonte: Autoria própria.

2.2 PROCESSO DE INOVAÇÃO

Alinhados os conceitos envolvidos na Inovação a próxima questão diz respeito à qual processo seguir para atingir-se um resultado inovativo?

Não é nosso objetivo aprofundar e discutir os inúmeros processos adotados ao longo do tempo ou diferentes empresas. Descreveremos sucintamente alguns conceitos do que hoje é conhecido como “Design Thinking”.

Mauricio Viana (Mauricio Viana, 2014) comenta “Foi buscando novos caminhos para a inovação que se criou o que hoje é conhecido como “Design Thinking”: uma abordagem focada no ser humano que vê na multidisciplinaridade, colaboração e tangibilização de pensamentos e processos, caminhos que levam a soluções inovadoras para negócios”.

Os conceitos, abordagens e ferramentas do “Design Thinking” se popularizaram e são largamente utilizados pelas empresas Startups, mas podem ser aplicados por qualquer tipo de empresa, grupos de pesquisa e desenvolvimento, entre outros, que tenham como meta desenvolver soluções inovadoras.

O “Desing Thinking” nos motiva a buscar soluções que sejam desejáveis ao cliente (seja o consumidor final de um produto ou uma etapa na Cadeia Produtiva). Uma vez compreendidas as reais necessidades destes clientes, são colocadas na balança as limitações de mercado que desenharão o alcance da solução final, o fator financeiro e os fatores técnicos necessários.

A figura da imagem 2.3, adaptada de (Echos) ilustra esses conjuntos de fatores de cuja interseção surge a Inovação.

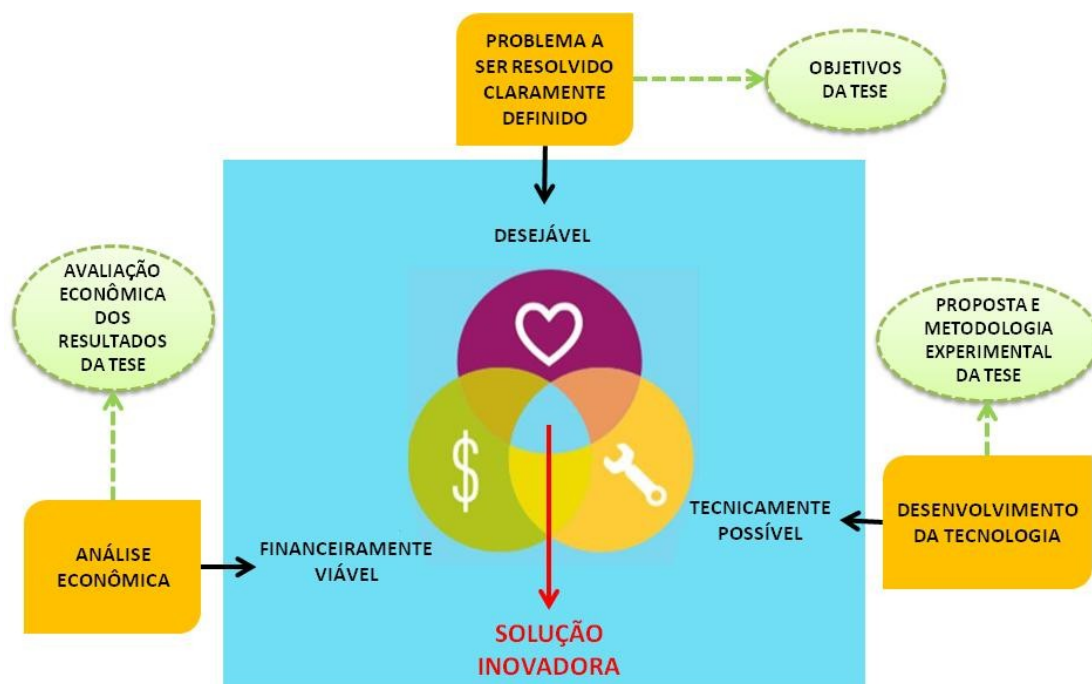
Figura 2.3 – Fatores que associados produzem uma solução inovadora



Fonte: adaptada de (Echos)

O desdobramento da figura 2.3, em ações pragmáticas definem as atividades a serem realizadas para o desenvolvimento desta tese, o que é apresentada na figura 2.4.

Figura 2.4 – Ações associadas à execução desta tese.



Fonte: autoria própria e adaptada de (Echos)

3 INTRODUÇÃO

3.1 IDENTIFICAÇÃO DOS PROBLEMAS A SEREM RESOLVIDOS.

A solução tecnológica, Célula Duplex de Limpeza e Nitretação por Plasma em Ciclo Único, descrita anteriormente (item 1.2), representa o estado da arte, no que se refere à aplicação da nitretação por plasma em bielas sinterizadas para compressores herméticos. Além dos benefícios financeiros obtidos, possui grande repetibilidade e produz camadas nitretadas com grande qualidade.

Inicialmente todo o desenvolvimento foi focado em reproduzir uma especificação para a camada de nitretos igual à já estabelecida para o produto e condizente com as possibilidades dos processos de nitretação a plasma disponíveis no mercado. Qual seja: *Nitretação por plasma, com espessura de camada branca de no mínimo 10 μm , com fase de nitretos tipo ϵ* . Além de esta especificação atender os requisitos de confiabilidade dos produtos.

O desenvolvimento e aplicação dos compressores herméticos possui a forte tendência no sentido da miniaturização do produto. Essa miniaturização pode se dar de duas formas, que definidas como: a) Miniaturização Direta ou b) Miniaturização Indireta.

- a) Miniaturização Direta: desenvolvimento de um novo compressor com dimensões reduzidas.
- b) Miniaturização Indireta: aplicação de um compressor menor em substituição de um compressor maior (por ex.: aplicar um compressor doméstico em uma aplicação comercial).

Importante ressaltar que as miniaturizações são desejadas no sentido de aumentar a densidade da Capacidade de refrigeração em relação ao tamanho dos compressores.

Outra tendência refere-se à utilização de gases refrigerantes naturais com destaque para os HCs (hidrocarbonetos), que não destroem a camada de Ozônio e minimizam fortemente os impactos no Aquecimento Global, além de serem encontrados em abundância na natureza, como o propano.

Estas duas tendências (ou demandas) mercadológicas implicam em aumentar o carregamento mecânico nos mancais destes novos compressores. A Miniaturização por aumentar a tensão de contato específica devido às reduções de dimensões dos mancais, frente aos mesmos carregamentos ou maiores carregamentos para a mesma dimensão, e os gases refrigerantes de hidrocarbonetos, como o propano, devido a sua menor compressibilidade.

Considerando esse cenário de tendências para o desenvolvimento de novos compressores identificou-se o risco de que a especificação atual da camada nitretada, aplicada nos olhais menores das bielas, não tenha características tribológicas suficientes para garantir a confiabilidade do produto quanto à sua resistência ao desgaste. Este fato é observado em testes de confiabilidade realizados em compressores protótipos submetidos a maiores carregamentos mecânicos, que não passaram, ou apresentaram resultados marginais, nos critérios de aprovação. Estes critérios de aprovação são apresentados e melhor entendidos no capítulo 8.

Riscos relacionados à falta de confiabilidade de produto não são aceitáveis.

A mitigação destes riscos de confiabilidade leva naturalmente à seguinte PERGUNTA-PROBLEMA:

- É possível desenvolver uma nova especificação para a camada nitretada por plasma, que aumente sua resistência ao desgaste e garanta a confiabilidade do produto?

A partir deste questionamento surge a motivação e objetivos deste trabalho, seguindo a tese de que é possível, em uma abordagem multi e interdisciplinar, associando os conhecimentos em desenvolvimento de Produtos (compressores), Metalurgia do pó, Tecnologia de plasma, Engenharia de Superfície (Tribologia), Técnicas de Caracterização e em Escalonamento de Processos de Nitretação por Plasma, otimizar o par tribológico (biela-pino do pistão), quanto ao aumento da resistência ao desgaste e consequentemente da confiabilidade em campo dos compressores, desenvolvendo uma nova especificação para a camada de nitretos. E adicionalmente, simplificar as etapas de fabricação, obter redução de custos e liderança tecnológica para a empresa.

A motivação quanto ao potencial de sucesso e benefícios parte dos presentes aspectos e fatos:

- Quanto aos equipamentos e processos de nitretação por plasma:
 - Possui-se Patente Global Embraco/LabMat: configuração catodo-anodo.
 - Possui-se diferencial quanto à remoção de óleo de calibração sob plasma, alta densidade de carga, alta homogeneidade térmica e de espessura de camada.
 - Possui-se o conhecimento para desenvolver Design otimizado para produção seriada.

- Quanto aos benefícios em Produto.
 - Possibilidade de obtenção de camada nitretada em um processo com Alta Capacidade (Cpk) quanto à espessura e fase de nitreto.
 - Possibilidade de obtenção de camadas mistas de nitreto e oxinitretos, que além de aumentar a confiabilidade reduzem a perda mecânica.
- Quanto à Liderança Tecnológica.

O desenvolvimento de uma nova especificação proporciona benefícios quanto à liderança tecnológica.

 - Solução exclusiva protegida por patentes.
 - A nova solução pode apoiar novos produtos em termos de confiabilidade, em projetos de miniaturização ou para a extensão da capacidade dos compressores atuais.
 - Bloqueio tecnológico pela Embraco em relação aos concorrentes.
 - Possibilidade de verticalização do processo de nitretação por plasma.

3.2 OBJETIVOS

O problema a ser resolvido se traduz no objetivo principal deste trabalho que consiste em:

- Desenvolver uma nova especificação de camada nitretada para bielas sinterizadas de compressores herméticos com maior resistência ao desgaste, que a especificação atual que define o uso de uma camada de nitretos formada pela fase ϵ .

Sendo que esta nova especificação de camada também deve atender os seguintes objetivos específicos:

1. A nova camada nitretada deve aumentar a confiabilidade do par tribológico BIELA versus PINO-DO-PISTÃO.
2. A nova camada nitretada deve possuir uma topografia mais refinada possibilitando a eliminação da etapa de escovação dos olhais das bielas após a nitretação.
3. As condições do processo de nitretação escolhidas devem permitir aumentar a produtividade (capacidade de carga do reator) do equipamento.

4. As condições do processo de nitretação escolhidas devem permitir otimizar e/ou eliminar etapas de limpeza das bielas antes da nitretação.
5. Realizar a avaliação econômica das soluções desenvolvidas.

A busca pela nova especificação que atenda os objetivos consistiu em realizar variações nos parâmetros da nitretação como será descrito no capítulo 5.

Todas as soluções técnicas e de processo desenvolvidas serão utilizadas para o projeto e construção de um novo reator de nitretação por plasma. Esta atividade será realizada paralelamente e não será tratada nesta tese. Somente a validação deste equipamento será abordada.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO.

Pode-se definir refrigeração como o processo de alcançar e manter uma temperatura inferior àquela do meio, cujo objetivo é resfriar algum corpo (sólido) ou fluido até uma dada temperatura ou ainda, o processo de mover calor de um local para outro utilizando um refrigerante em um ciclo fechado.

O calor pode ser retirado diretamente pelo refrigerante primário ou através de um refrigerante secundário (salmouras, glicóis, etc.).

A faixa de aplicação dos processos de refrigeração vai de temperaturas desde 20 °C até temperaturas inferiores a -80 °C além de umidades relativas de 95% a 0% ou combinações entre estes valores. Temperaturas menores que estas pertencem ao ramo da Criogenia que é especializada na produção e utilização de gás natural liquefeito, oxigênio e nitrogênio líquido além do dióxido de carbono, por exemplo.

4.1.1 UMA BREVE HISTÓRIA DA REFRIGERAÇÃO NO MUNDO. (MACAGNAN, 2018)

A história da refrigeração data de tempos pré-históricos onde se armazenava alimentos em cavernas, com paredes úmidas, para preservá-los tomando vantagem do efeito do resfriamento natural. A história da refrigeração é muito interessante uma vez que cada aspecto, disponibilidade dos refrigerantes, acionadores, desenvolvimento dos compressores e dos métodos de refrigeração em si, fazem parte dela.

Os habitantes da ilha de Creta, no mar Mediterrâneo já sabiam, em 2000 AC, que baixas temperaturas eram de grande importância para a preservação dos alimentos. Alexandre, o Grande, cerca de 300 AC, mandou servir a seus soldados, para levantar a moral da tropa, bebida gelada (com neve). Em 755 DC, Khalif Madhi operava o primeiro “transporte refrigerado” desde o Líbano até a cidade de Meca, através do deserto, usando neve como refrigerante.

Em 1040 DC, o sultão do Cairo usava neve, transportada diariamente da Síria, nas suas cozinhas.

Desde tempos remotos até o início do século 20, as pessoas recolhiam o gelo natural durante o inverno e o armazenavam, durante um ano ou mais, em galpões, celeiros e posteriormente em armazéns. Nos Estados Unidos, em meados do século 19, existia a rota do gelo natural, centrada principalmente nos rios Hudson e Maine. Também na Europa, nesta mesma época, blocos de gelo provenientes da Noruega tinham grande procura.

Desde 1805 até o final do século 19, barcos transportavam gelo natural desde a América do Norte até muitos países quentes, tais como Índias Orientais, Europa e mesmo Índia e Austrália.

Em 1806, Frederic Tudor, mais tarde conhecido como o “rei do gelo” começou o comércio cortando blocos de gelo no rio Hudson e lagos de Massachusetts, como mostra a figura 4.1.

Figura 4.1 - Métodos de corte e extração de gelo de rios e lagos, no século XIX.



Fonte: (MACAGNAN, 2018)

Esse gelo era vendido tanto no mercado interno como exportado para vários países, incluindo a Índia.

Esse mercado também foi muito popular no Reino Unido, Rússia, Canadá, Noruega e França. O seu pico foi alcançado em torno do ano de 1872 quando, somente os Estados Unidos, exportaram cerca de 225.000 ton. de gelo para vários países, incluindo China e Austrália.

Com o advento da refrigeração artificial, bem como poluição dos rios e lagos em função do desenvolvimento industrial, o mercado foi diminuindo gradualmente até seu desaparecimento.

O gelo era armazenado, no solo ou em galpões, as câmaras frigoríficas da época. Como material isolante era utilizada a serragem e mais tarde a cortiça. Esses locais de armazenamento, chamados de “ice houses” (casas de gelo), foram construídos em diversos locais e, para compensar a carência de bons isolantes térmicos, a espessura das paredes era bastante grande, acima de 1 m. Na Figura. 4.2 apresentam-se alguns exemplos de “ice houses” (casas de gelo).

Figura 4.2 - Ice houses construídas nos Estados Unidos (a) e no Irã (b).



(a)

(b)

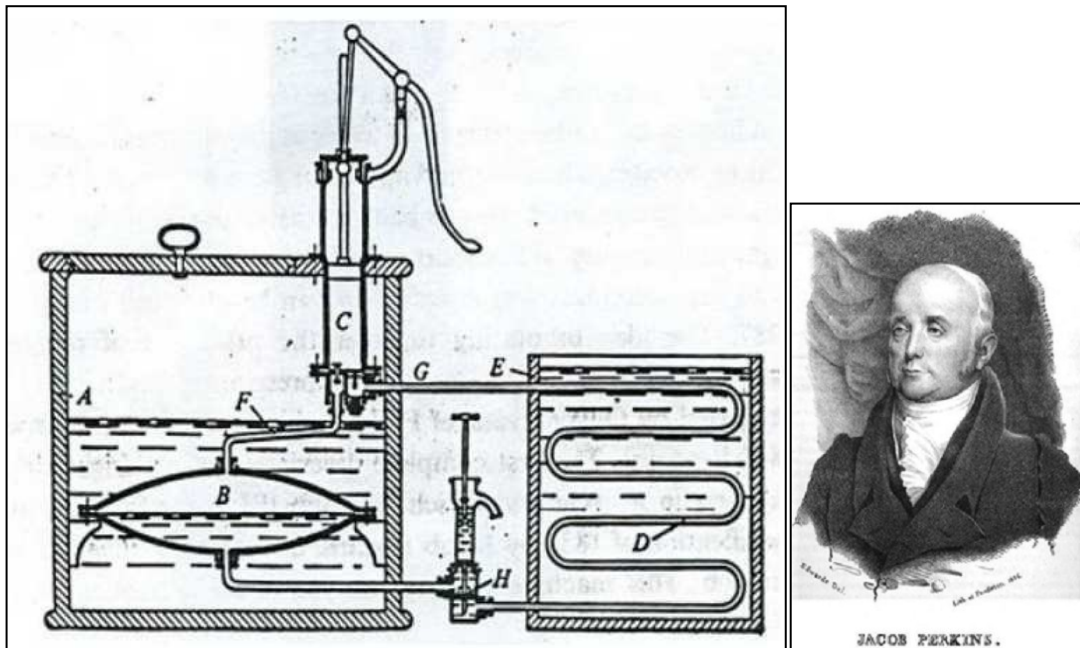
Fonte: (MACAGNAN, 2018)

Foi aproximadamente no final dessa época quando a refrigeração mecânica surgiu (os compressores e o ciclo de refrigeração). Há certa concordância histórica que a refrigeração artificial inicia em 1755 quando o professor escocês Willian Cullen construiu a primeira máquina de refrigeração, produzindo em laboratório pequena quantidade de gelo. O experimento consistiu em colocar em contato térmico a água com um tanque contendo éter a baixa pressão. Ao evaporar, o éter retirou calor da água possibilitando seu congelamento. No entanto, essa descoberta ficou sem utilização.

Apesar de rudimentar, essa máquina trabalhou com o princípio básico da refrigeração moderna que é a habilidade de certos líquidos em absorver grandes quantidades de calor ao vaporizar. Assim, deve ser dito que a refrigeração mecânica nasceu quando o escocês William Cullen conseguiu, em 1755, fabricar gelo evaporando éter a baixa pressão.

Entretanto, foi somente em 1834 quando o americano Jacob Perkins obteve a patente inglesa nº 6662 de uma máquina de compressão de vapor, mostrada na Figura 4.3, que surgiu o conceito moderno de refrigeração.

Figura 4.3 - Esquema da máquina de refrigeração inventada por Perkins.



Fonte: (MACAGNAN, 2018)

Nessa máquina, as duas caixas (A e E) funcionam como o evaporador e o condensador, respectivamente. O elemento C, uma bomba de vácuo manual, faz o papel do compressor nos sistemas modernos. Em B está o líquido (éter) que vaporiza em função da diminuição da pressão, esfriando a água. O elemento H opera como um dispositivo de expansão.

No entanto, os créditos do início da refrigeração moderna pertencem a James Harrison, um escocês que emigrou para a Austrália em 1837 e inventou, em 1850, a primeira máquina de refrigeração com compressão de vapor, que em seguida entrou em operação comercial. Um esboço dessa máquina é apresentado na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Máquina de refrigeração construída por Harrison.



Fonte: (MACAGNAN, 2018)

Em 1920 surgiram os primeiros refrigeradores domésticos em unidades seladas, como o mostrado na Figura 4.5, o **Monitor Top**. No primeiro ano, foram fabricadas nos Estados Unidos aproximadamente 5.000 unidades. Após dez anos, este número cresceu para um milhão e em 1935 chegaram a 6 milhões de unidades. No início, os refrigerantes utilizados eram todos tóxicos, como o dióxido de enxofre e o cloreto de metileno e metanoato de metila. Diversos acidentes fatais ocorreram na década de 1920, em função de vazamentos de cloreto de metila. Isso levou a mídia da época lançar uma campanha para proibir o uso desses refrigeradores.

Figura 4.5 - Detalhe de um dos primeiros refrigeradores domésticos com unidades seladas produzidos no mundo. Monitor Top



Fonte: Adaptado de (MACAGNAN, 2018)

Em 1928, a Frigidaire, maior fabricante de refrigeradores na época, solicitou a um grupo de cientistas, liderados por Thomas Midgley a elaboração de um refrigerante não tóxico ou inflamável. Alguns meses depois, nasceu o primeiro refrigerante sintético, o R-12. Em 1930, em um encontro da Sociedade Americana de Química Migley apresentou este refrigerante demonstrando suas vantagens em termos de segurança e eficiência. Comenta-se que durante a apresentação, Migley inalou o refrigerante e o soprou sobre a chama de uma vela, apagando-a, demonstrando suas características não toxicidade e não inflamabilidade. Um ano mais tarde, o R-12 foi introduzido na refrigeração comercial, nascendo a indústria dos fluorcarbonos. Da união de duas empresas, DuPont e General Motors, nasceu a Kinetic Chemicals Inc, quando então foi registrado a marca Freon®. No ano seguinte, o Freon® 12 começa a ser produzido em grande escala, nascendo então a indústria da refrigeração como é conhecida hoje.

A partir desta data os refrigeradores domésticos passaram a seguir um mesmo padrão de construção: alimentação elétrica, sistema hermético, tubo capilar como dispositivo de expansão e utilização de materiais não ferrosos.

Em 1974 os refrigerantes halogenados foram associados com problemas ecológicos como a rarefação da camada de ozônio e o efeito estufa. Surgiram então novos refrigerantes, como por exemplo, o HFC-134a, que não contém cloro e, portanto, não agride a camada de ozônio da atmosfera. Este refrigerante, apesar de ser largamente utilizado em sistemas domésticos de refrigeração, tem um efeito marcante sobre o efeito estufa (aquecimento global). Este fato fez com que muitos países, especialmente europeus, passassem a utilizar hidrocarbonetos puros, como o isobutano (HC-600a), como fluido refrigerante.

4.1.2 APLICAÇÕES DA REFRIGERAÇÃO. (THIESSEN, 2009)

As aplicações da refrigeração podem ser reunidas dentro das seis categorias:

- Refrigeração doméstica: refrigeradores e congeladores domésticos, bebedouros, frigobares. Possuem potências nominais pequenas (até 0,5 CV) e são do tipo hermético.
- Refrigeração comercial: ilhas, vitrines e balcões refrigerados (supermercados), freezers (0,5 a 1,5 CV) e são do tipo hermético.
- Refrigeração industrial: Como regra geral são maiores que as comerciais em tamanho e quase sempre requerem um operador de serviço. Aplicações típicas:
 - indústria de alimentos (1,5 a 25 CV)

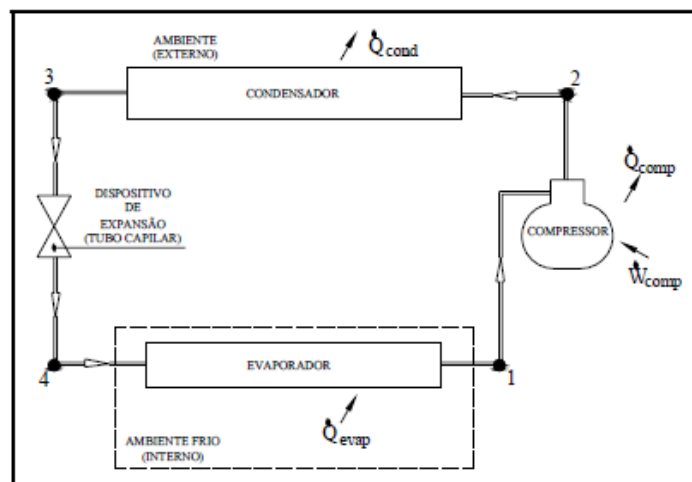
- Refrigeração marítima e de transporte: Inclui aplicações como: refrigeração para barcos de pesca e embarcações de transporte de carga perecível, navios de armazenamento, etc. A refrigeração de transporte está relacionada com transportes de cargas em caminhões, vagões ferroviários, etc
- Condicionamento de ar: (para conforto humano ou para uso industrial)

4.1.3 REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO MECÂNICA DO VAPOR. (GONÇALVES, 2004)

Os sistemas de refrigeração por compressão mecânica de vapores são constituídos por quatro componentes principais: compressor, condensador, dispositivo de expansão e evaporador, montados na forma indicada na figura 4.6.

Nesse sistema um fluido refrigerante circula no sentido indicado pelas setas, sob a ação de um compressor. Refrigerante líquido proveniente do condensador (ponto 3) é expandido no dispositivo de expansão originando uma mistura de líquido e de vapor saturado a baixa pressão e temperatura (4). Essa mistura entra no evaporador, onde evapora promovendo a queda da temperatura do meio a refrigerar. O refrigerante sai do evaporador no estado de vapor saturado (1) e é, então, succionado pelo compressor, onde a sua pressão e temperatura são elevadas (2). Do compressor o refrigerante passa para o condensador, retornando à condição de líquido (3), fechando, assim, o ciclo termodinâmico.

Figura 4.6 – Ciclo padrão de refrigeração por compressão mecânica de vapores



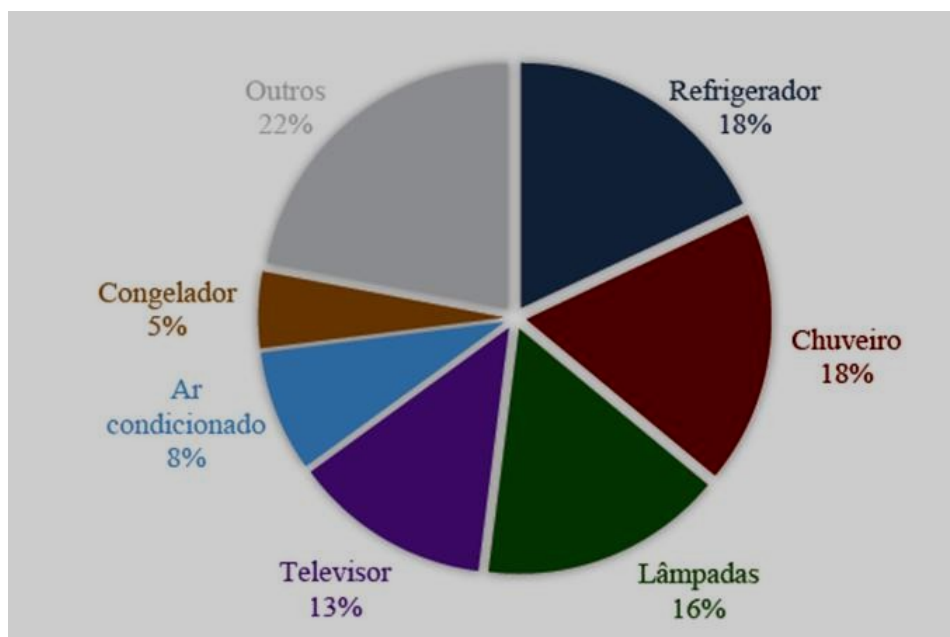
Fonte: (GONÇALVES, 2004)

4.1.4 CONTEXTO SÓCIO-ECONÔMICO.

O refrigerador se tornou um eletrodoméstico indispensável na vida da população. No Brasil, segundo a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (IBGE, 2013) existem cerca de 76 milhões em operação. Praticamente toda residência com energia elétrica possui hoje um refrigerador. No ano de 2012, o setor de refrigeração doméstica teve uma participação de 23 % em todo o consumo residencial do Brasil (EPE, 2014), conforme ilustrado na Figura 4.7. (ESPÍNDOLA, 2017)

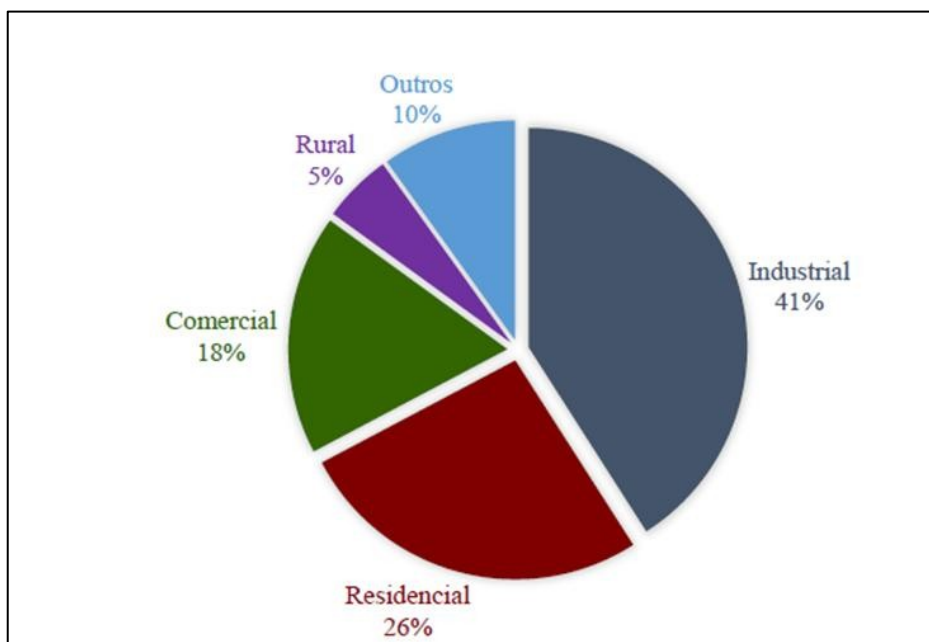
No mesmo ano de 2014, o Balanço Energético Nacional divulgado pela Empresa de Pesquisa Energética do Brasil (EPE, 2013) mostrou que o setor residencial foi responsável por cerca de 26 % de toda a energia elétrica consumida no País, como pode ser visto na Figura 4.8. Portanto, o setor de refrigeração doméstica foi responsável por cerca de 6 % de toda energia elétrica consumida no Brasil no ano de 2012. (ESPÍNDOLA, 2017)

Figura 4.7 - Distribuição do consumo de energia elétrica residencial no Brasil (EPE, 2014)



Fonte: Adaptado de (ESPÍNDOLA, 2017)

Figura 4.8– Distribuição da energia elétrica consumida no Brasil por setor (EPE, 2013)



Fonte: Adaptado de (ESPÍNDOLA, 2017)

Nesse contexto, ao longo dos últimos anos, políticas de etiquetagem, que classificam os produtos em categorias de eficiência, foram introduzidas no Brasil e em muitos outros países. Aliado a isso, os consumidores estão cada vez mais conscientes do impacto ambiental causado por produtos de baixo desempenho. Assim, um dos grandes esforços da indústria em geral está concentrado em projetos de pesquisa e desenvolvimento no setor, já que melhorias na eficiência dos sistemas de refrigeração podem contribuir significativamente na redução do consumo de energia elétrica de um país. (ESPÍNDOLA, 2017)

A cadeia do frio é um complexo de atividades que compreendem a refrigeração industrial e doméstica. Este ciclo é totalmente dependente da disponibilidade da energia elétrica. Grande parte da energia elétrica utilizada é aplicada no acionamento dos compressores.

Uma pequena quantidade da energia consumida é demandada pelos equipamentos de proteção, regulagem e controle.

O compressor é o “coração” do sistema de refrigeração e o desenvolvimento e aperfeiçoamento destes compressores tem sido foco de inúmeros trabalhos de pesquisa e desenvolvimento, tanto no setor produtivo, quanto na academia.

4.2 COMPRESSORES DE REFRIGERAÇÃO.

4.2.1 INTRODUÇÃO.

O compressor é um dos quatro componentes principais de um sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor. Como a tarefa do compressor num sistema de refrigeração é entregar energia de fluxo ao fluido de trabalho para que este percorra o circuito e realize as trocas de calor estabelecidas, fica evidente que o compressor pode ser considerado como o coração do sistema de refrigeração.

Há dois tipos básicos de compressores, quanto ao princípio de compressão: os de deslocamento positivo e os dinâmicos, conforme esquema mostrado na Fig. 4.9.

Figura 4.9 – Tipos de compressores de refrigeração quanto ao princípio de compressão.



Fonte: autoria própria

Os compressores de **deslocamento positivo** aumentam a pressão do vapor do refrigerante através da redução do volume da câmara de compressão pela aplicação de trabalho mecânico. Exemplos desses compressores são os alternativos, os rotativos (parafuso, scroll, pistão rolante e palhetas).

Os **compressores dinâmicos** aumentam a pressão do vapor do refrigerante através da transferência contínua de momento angular pelas pás do rotor, acelerando o refrigerante, seguido de uma conversão desse momento em um aumento de pressão, isso é, a conversão da energia cinética em energia de pressão. Os compressores centrífugos são exemplos de compressores dinâmicos.

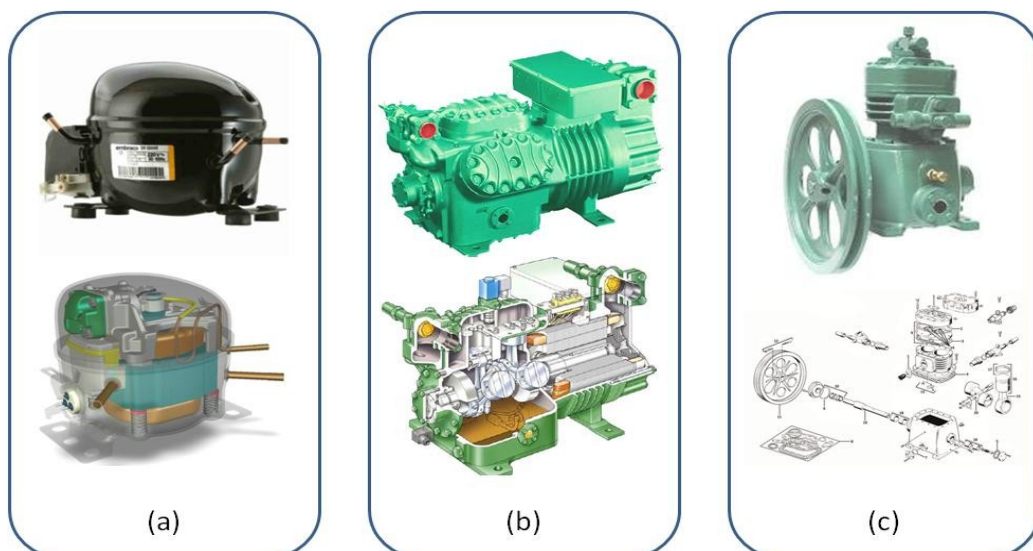
Os compressores alternativos são os mais empregados e podem ser subdivididos em três categorias: compressor hermético, semi-hermético e aberto.

Compressor hermético: o sistema de compressão é interligado ao motor elétrico de tal forma que permite o compartilhamento de componentes dos sistemas elétrico e mecânico. Neste caso, todos os componentes são vedados do ambiente externo por uma carcaça de aço sem a possibilidade de uma eventual manutenção. O vapor do refrigerante, proveniente do evaporador, é aspirado pelo compressor, entrando em sua carcaça, e é aspirado pela câmara de compressão.

- **Compressor semi-hermético:** apesar de também compartilhar a mesma carcaça com o motor elétrico, existem acessos que permitem reparos de seus componentes internos. A capacidade de refrigeração desse compressor é mais elevada do que as dos compressores herméticos.
- **Compressor aberto:** não existe nenhuma interligação entre as carcaças do sistema mecânico e a do acionador, com exceção do eixo, que pode ser um motor elétrico, uma turbina ou um motor de combustão, caso comum em sistemas de transporte de produtos resfriados. Este é o compressor mais utilizado na refrigeração industrial pela sua facilidade de reparo e por ser um equipamento mais robusto e de maior capacidade com relação aos demais. A figura 4.10 mostra detalhes destes três tipos de compressores alternativos.

Figura 4.10 – Subclassificação dos compressores alternativos.

(a) hermético; (b) semi-hermético; (c) aberto.



Fonte: autoria própria

Em sistemas de aplicação doméstica e comercial leve (sistemas de capacidade de refrigeração não muito elevada), predomina a aplicação dos compressores alternativos herméticos.

4.2.2 COMPRESSORES HERMÉTICOS ALTERNATIVOS.

O primeiro compressor hermético se deve a uma experiência realizada pelo físico francês Marcel Audiffren em 1894. A invenção ficou parada até 1911 quando voltou a tona, desenvolvida pela General Electric. Apesar do empenho dedicado às pesquisas até 1928, a produção não passou de 200 unidades ao ano. (NEULAENDER, PAULO, 2017)

O compressor hermético alcançou uma posição de destaque quando foi lançado o famoso refrigerador doméstico Monitor Top. (NEULAENDER, PAULO, 2017)

A primeira indústria nos Estados Unidos que iniciou a fabricação de compressores herméticos em grande escala, destinados a abastecer os fabricantes de eletrodomésticos, foi a Servel, que se firmou em 1933. (NEULAENDER, PAULO, 2017)

O desempenho dos compressores alternativos herméticos é o resultado de diversos compromissos de projeto envolvendo desde as limitações físicas do refrigerante, do kit de compressão e do motor, buscando sempre atender as seguintes condições:

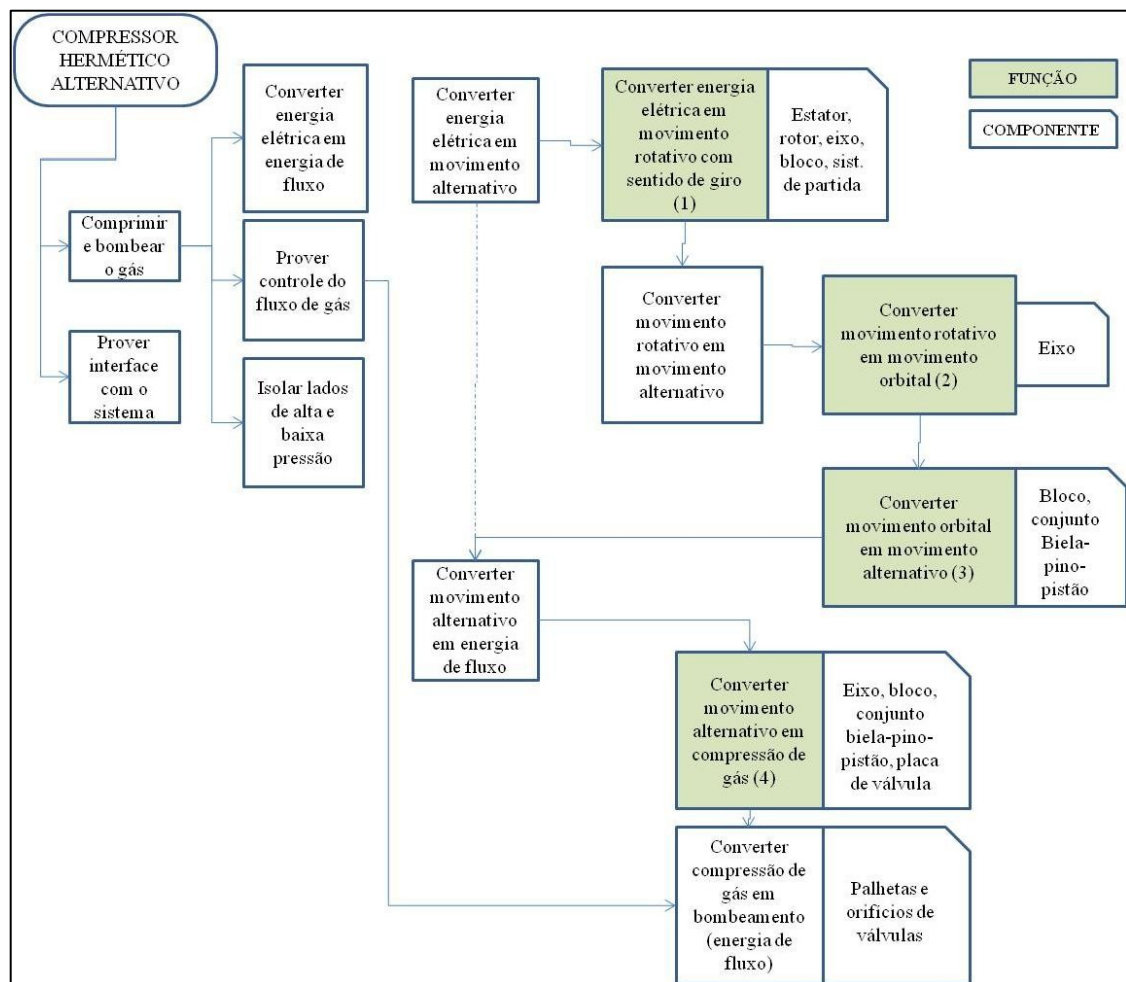
- Possuir pequeno volume ocupado pelo conjunto motor/compressor,
- Possuir facilidade de manuseio por parte das montadoras de sistemas de refrigeração,
- Possuir baixo nível de vibração e ruído,
- Apresentar ausência de vazamentos do gás refrigerante, Principal diferencial dos compressores herméticos.
- Eficiência: Obter o maior efeito de refrigeração para um menor consumo de potência
- Confiabilidade estrutural, elétrica e tribológica. Espera-se que o compressor funcione entre 10 e 15 anos sem perda de desempenho ou falha.

4.2.3 COMPRESSOR HERMÉTICO ALTERNATIVO EM DETALHES.

A seguir vamos descrever em mais detalhes a constituição construtiva dos compressores herméticos.

Os compressores herméticos realizam a conversão da energia elétrica em energia mecânica de bombeamento. Para tanto utilizam o sistema biela-manivela onde o movimento rotativo gerado pelo motor elétrico é transformado em deslocamento linear de um pistão que resulta no bombeamento do gás de refrigeração. O diagrama funcional de um compressor é apresentado na figura 4.11, desdobrado até seus componentes. (MANKE, 2011)

Figura 4.11- Diagrama funcional de um compressor hermético.



Fonte: (MANKE, 2011)

Uma vista explodida de um compressor hermético típico é mostrada na figura 4.12.

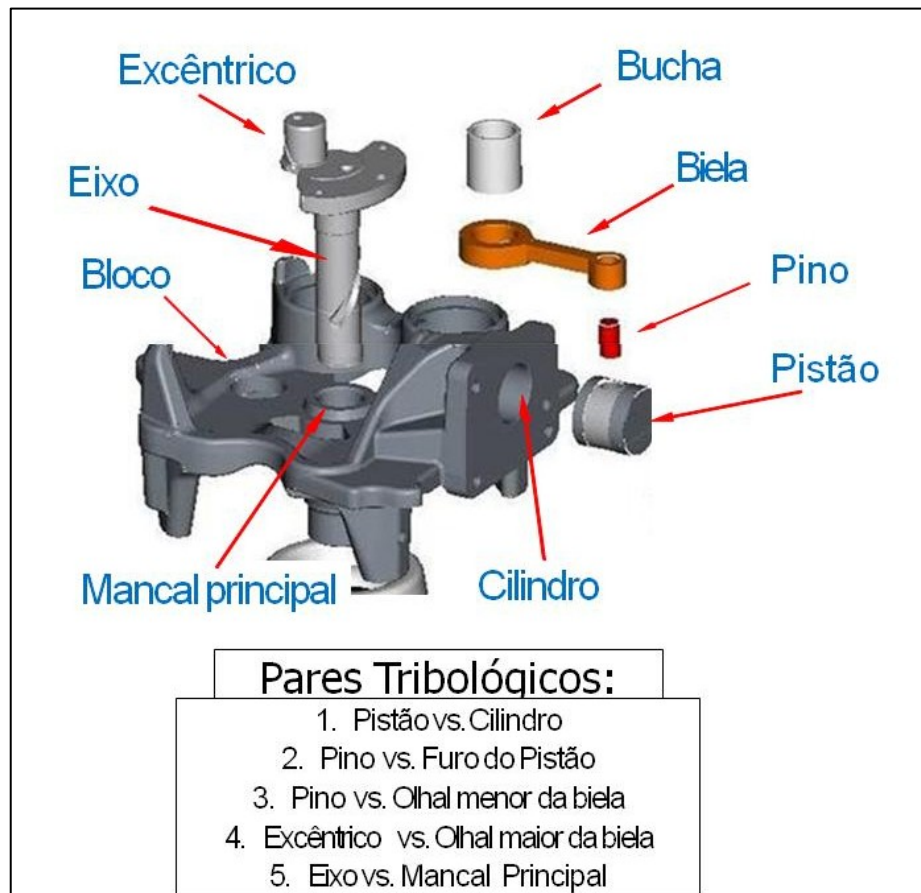
Figura 4.12 – Vista explodida de um compressor hermético típico.



Fonte: Catálogo Embraco

Analisando em mais detalhes os componentes integrantes do subconjunto responsável pela conversão do movimento rotativo do motor em movimento alternado do pistão, o KIT MECÂNICO, verifica-se eles apresentam movimentos relativos entre si, e desta forma necessitam de mancalizações. A figura 4.13 mostra o kit mecânico em maiores detalhes, identificando os pares tribológicos (mancais) que o constituem.

Figura 4.13 – Kit mecânico de compressor hermético: pares tribológicos



Fonte: autoria própria

O funcionamento adequado do compressor depende, principalmente, do funcionamento adequado dos mancais neles existentes. Os mancais são responsáveis pela transmissão de forças e desta forma estão sujeitos ao atrito. Sendo elementos de máquinas submetidos às forças de atrito, os mancais de deslizamento deverão apresentar um sistema de lubrificação eficiente, uma vez que, associados ao atrito, estão o desgaste, a geração de calor e a perda mecânica.

As exigências do mercado de refrigeração, principalmente nas aplicações domésticas, para os compressores herméticos podem ser agrupadas em 4 grandes características:

- Eficiência energética.
- Baixo ruído e vibração.
- Baixo custo.
- Qualidade e Confiabilidade.

A qualidade e confiabilidade dos compressores estão diretamente relacionadas ao pleno funcionamento dos mancais do kit mecânico. A falha dos mancais é motivo

suficiente para que estas máquinas tenham seu rendimento comprometido ou até mesmo parem de funcionar.

A vida útil esperada de um compressor é de 10 a 15 anos. Considerando 10 anos, isso significa uma vida operacional de aproximadamente **50.000** horas, sem redução de desempenho. Um automóvel normalmente tem uma vida operacional **de 4.000** horas. Acrescente-se o fato de que os compressores herméticos não permitem manutenção (como troca de óleo), e podemos imaginar os desafios de engenharia para o correto dimensionamento e seleção de materiais para os mancais destas máquinas. (THIESSEN, 2009)

4.2.4 MANCAIS EM COMPRESSORES HERMÉTICOS DE REFRIGERAÇÃO.

Como já citado, a confiabilidade do compressor hermético está diretamente ligada à confiabilidade dos mancais do kit mecânico. Esta confiabilidade é obtida com a aplicação de lubrificante e o adequado dimensionamento dos mancais que inicia-se a partir da definição do tipo de gás refrigerante (R660a ou R134a, por exemplo), pela viscosidade do óleo lubrificante (ISO 2, 5, ou 10) e a seleção dos materiais a serem utilizados na fabricação dos diferentes componentes.

4.2.4.1 Lubrificação em compressores herméticos.

- Lubrificantes.

Quando se pensa nas funções de um óleo lubrificante, de imediato é listado as funções de reduzir o atrito e o desgaste no contato entre os componentes móveis. Mas o óleo lubrificante também possui outras funções, que no caso dos compressores herméticos, são tão importantes, quanto as anteriores. (MANKE, 2011)

- Controle de temperatura e trocas térmicas: a circulação e o borrifamento do óleo durante o funcionamento do compressor promovem o resfriamento e a transferência do calor gerado para a carcaça e em seguida ao ambiente externo
- Mitigação de ruído: o óleo atua como elemento de amortecimento de impactos em folgas e válvulas.
- Agir como um selante: a presença do filme de óleo na folga pistão-cilindro e nas válvulas de sucção e descarga minimiza o vazamento do fluido refrigerante entre as regiões de alta e baixa pressão.

Outro aspecto relacionado aos lubrificantes utilizados diz respeito a sua viscosidade. Como o projeto do kit mecânico também deve considerar a minimização das perdas mecânicas, procura-se reduzir as perdas por atrito viscoso usando-se óleos de baixa viscosidade, com ISO 5, por exemplo, nos compressores de alta eficiência. As principais características de um óleo lubrificante para compressores herméticos são: (MANKE, 2011)

- Lubricidade: a capacidade de resistir ao desgaste;
- Viscosidade: resistência à mudança de forma;
- Estabilidade térmica e química;
- Miscibilidade e solubilidade no gás refrigerante.

- Regimes de lubrificação.

O objetivo da lubrificação é separar as superfícies através da introdução de um filme contínuo de óleo entre as superfícies em contato dos mancais, evitando o desgaste e reduzindo significativamente as perdas mecânicas.

De maneira sucinta, os principais tipos de lubrificação que ocorrerem nos mancais de um compressor são:

- Lubrificação Hidrodinâmica: a pressão do filme de óleo, gerada pelo efeito cunha, garante a separação entre as superfícies do par tribológico. Enquanto houver a pressão do filme de óleo as superfícies não se tocam e o desgaste é nulo. O coeficiente de atrito nesta situação é menor a 0.001.

Um processo de geração de pressão secundária do óleo é o efeito “squeeze film” (efeito de filme-espremido).

- Lubrificação Limite: é quando as superfícies estão separadas somente por uma película molecular fina de lubrificantes. Ocorre a partir da quebra do filme hidrodinâmico de lubrificante (momento da partida e parada do mecanismo), ou nos mancais que não possuem movimento contínuo. Neste caso há contatos parciais das superfícies. Os danos superficiais ainda são menores que os presentes no deslizamento puro. O coeficiente de atrito neste caso é em torno de 0,1.

4.2.4.2 Classificação dos pares tribológicos quanto ao tipo de lubrificação.

O regime (tipo) de lubrificação atuante em cada mancal dependerá principalmente de sua geometria e tipo de movimento.

Um regime hidrodinâmico, que seria o ideal, só se estabelece em mancais radiais, mas que mudam para o regime de filme-espremido e limite, nos momentos de parada e partida do mecanismo.

Em mancais axiais alternativos e pendulares raramente se estabelece uma lubrificação hidrodinâmica, predominando os regimes de lubrificação limite e de filme-espremido.

O conhecimento dos diferentes regimes de lubrificação atuantes em cada tipo de mancal permite estabelecer um nível de risco quanto à confiabilidade tribológica de cada par. Para os pares com a maior ocorrência de contato entre as superfícies, torna-se crucial a seleção correta do tipo de material a ser utilizado na fabricação dos componentes que garantam uma adequada resistência ao desgaste.

A tabela 4.1 categoriza os diferentes mancais do compressor hermético, quanto ao regime de lubrificação atuante e o nível de risco para a garantia da confiabilidade tribológica.

Tabela 4.1 – Pares tribológicos x lubrificação e risco de falha.

Lubrificação predominante	PARES TRIBOLÓGICOS					RISCO DE FALHA
	Excêntrico vs. Olhal maior da biela	Eixo vs. Mancal Principal	Pistão vs. Cilindro	Pino vs. Furo do Pistão	Pino vs. Olhal menor da biela	
Hidrodinamico	X	X	X			Baixo
Filme-espremido	X	X	X	X	X	Médio
Limite	X	X	X	X	X	Alto

Fonte: Adaptado de: (MANKE, 2011)

Analisando a tabela 4.1, torna-se evidente que os pares tribológicos com o pior regime de lubrificação são o par Pino de pistão-Olhal menor e o par Pino-Furo do Pistão. No entanto no par Pino-Furo do Pistão a área de distribuição de cargas é maior e o mesmo é montado sem movimento relativo, por interferência ou com pino transversal.

Portanto o par Pino de pistão-Olhal menor é o conjunto de componentes que necessita uma solução de materiais de alta resistência ao desgaste.

4.3 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE BIELAS PARA COMPRESSORES HERMÉTICOS.

As bielas de compressores herméticos, com poucas exceções, são fabricadas pelo processo de Metalurgia do Pó (sinterização) e em seguida submetidas a algum tipo de tratamento termoquímico (nitretação ou ferroxidação, por exemplo.) ou químico, como fosfatização mangânica, para melhorar suas características de resistência ao desgaste. No caso da Embraco, tratando-se de compressores de alta eficiência, as bielas sinterizadas são submetidas à nitretação por plasma.

4.3.1 METALURGIA DO PÓ.

Segundo (KASOUF, APELIAN, & GUMMESON, 2002), além da Indústria de automóveis, que abrange 70,0% das aplicações da Metalurgia do Pó, existem outros campos de aplicação que a utilizam, como por exemplo, para a fabricação de ferramentas e equipamentos esportivos (16,0%), aparelhos domésticos (3,2%), “hardware” (1,3%), equipamentos industriais (3,2%), materiais para escritório (1,3%) e outros (5,0%).

Tradicionalmente, o processo de metalurgia do pó é desenvolvido em quatro etapas básicas, que são: produção dos pós, mistura de pós e aditivos, compactação/moldagem (conformação/obtenção da forma) e sinterização (THUMMLER & OBERACKER, 1993). A microestrutura obtida no material depende de todas estas etapas. Na etapa de compactação ou moldagem é estabelecida a geometria do componente quando da produção de peças. Na etapa de sinterização estabelece-se a microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas. Estas, além de dependerem da composição da liga (elementos de liga presentes) dependem dos parâmetros de processamento como: tipo e tamanho do pó de ferro utilizado, pressão de compactação, temperatura e tempo de sinterização e atmosfera utilizada. Na metalurgia do pó ferrosa os elementos de liga mais utilizados na produção industrial são: Cu, Ni, C, P e Mo (THUMMLER & OBERACKER, 1993).

A metalurgia do pó ferrosa tem como principais vantagens (METALS HANDBOOK, ASTM: Powder Metallurgy, v7, 9 edition, 1984).

- Perda mínima de matéria-prima;

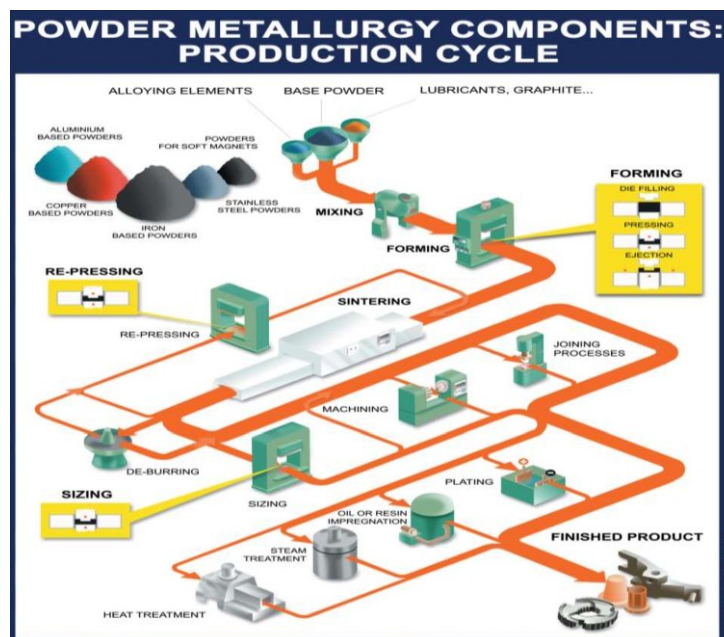
- Fácil controle da composição química do material;
- Temperatura de sinterização baixa se comparada com a fundição;
- Obtenção de componentes acabados com estreitas tolerâncias dimensionais;
- Versatilidade: diferentes peças podem ser fabricadas com o mesmo equipamento, trocando-se apenas o ferramental de compactação;
- Processo produtivo de fácil automação;
- Uso mais eficiente de matérias-primas e de energia;
- Processo mais econômico para a produção de peças em grandes séries.

Os avanços tecnológicos ocorridos nos processos de produção de pós, levando a pós de elevada qualidade, e o aperfeiçoamento das técnicas de compactação e sinterização alcançadas nas últimas três décadas, resultaram na obtenção de componentes com desempenho cada vez maior. Adicionalmente, a necessidade de diminuir custos de fabricação, bem como, o crescimento da demanda por peças vem promovendo um contínuo crescimento da metalurgia do pó.

4.3.1.1 Etapas do processo de fabricação de componentes sinterizados

As etapas básicas do processo de obtenção de componentes sinterizados serão descritas a seguir. O esquema da figura 4.14, ilustra o fluxo produtivo clássico da metalurgia do pó.

Figura 4.14 – Ciclo de produção clássico da metalurgia do pó



Fonte: Banner MPIF.ORG

- **Obtenção dos pós.**

Existem vários processos desenvolvidos para a obtenção de pós metálicos, que podem ser agrupados em processos mecânicos, físicos, químicos ou eletrolíticos. No entanto, a escolha do processo mais adequado depende fundamentalmente do conjunto de propriedades mecânicas, físicas e químicas de cada material (KLEIN, 2002). As tecnologias mais utilizadas para a fabricação de pó de ferro são: atomização de metal líquido, redução de óxido de ferro no estado sólido através de C e H₂ ou a combinação desses dois (THUMMLER & OBERACKER, 1993).

- **Mistura dos pós**

Nesta etapa são adicionados os elementos de liga e também um lubrificante sólido, que tem como função diminuir o atrito das partículas com a parede da matriz e das partículas entre si, durante a compactação. Além disso, o lubrificante possui também a função de diminuir a carga de extração, uma vez que o compactado verde possui resistência muito baixa, o que o torna susceptível ao trincamento quando a extração é dificultada. O lubrificante é removido por volatilização durante uma etapa anterior a de sinterização (LENEL, 1980) (THUMMLER & OBERACKER, 1993).

- **Compactação**

Na compactação ocorre a densificação da massa de pó e se obtém o componente na geometria desejada. A densidade a verde alcançada depende da pressão de compactação e da ductilidade dos pós utilizados. Para pós dúcteis a compactação é principal etapa de densificação no processamento por metalurgia do pó.

Existem várias técnicas de conformação de pós, dentre as quais: compactação uniaxial em matrizes, compactação isostática, injeção de pós, laminação de pós e extrusão de pós. No caso da metalurgia do pó ferrosa, a técnica mais utilizada é a compactação uniaxial em matriz, devido a sua facilidade de automação, alta produtividade e baixo custo. Esta é normalmente realizada a frio por meio de um sistema matriz-punções, onde a carga é aplicada de forma uniaxial com efeito duplo (matriz flutuante) (THUMMLER & OBERACKER, 1993).

- **Sinterização**

Nesta etapa do processo, o compactado verde adquire as propriedades mecânicas características do componente sinterizado, fortemente influenciadas pela porosidade residual, inerente aos produtos obtidos por metalurgia do pó.

Segundo (THUMMLER & OBERACKER, 1993) pagina 181 "... a sinterização é entendida como sendo o transporte de matéria, ativado termicamente, em uma massa de pós ou um compactado poroso, resultando na diminuição da superfície específica livre pelo crescimento de contatos entre as partículas, redução do volume e alteração da geometria dos poros".

Na metalurgia do pó ferrosa são adotadas como condições usuais para a sinterização temperatura entre 1100 e 1300°C, tempos entre 30 e 60 minutos e atmosferas contendo hidrogênio, nitrogênio, e/ou monóxido de carbono (KLEIN, 2002).

Em essência a fabricação por metalurgia do pó estaria concluída após a sinterização, no entanto, outras operações complementares, como a calibração, usinagem, tratamento térmicos, tratamentos termoquímicos, como nitretação ou oxidação a vapor, escovação e tamboreamento, podem ser necessárias. Isso vai ser definido em função dos requisitos especificados para cada componente sendo fabricado, tais como resistência mecânica, tolerâncias dimensionais, estanqueidade e resistência ao desgaste, necessários para sua aplicação.

- **Operações secundárias.**

Como existe uma gama de possíveis operações secundárias ao processo de Metalurgia do Pó, estas serão restringidas àquelas normalmente utilizadas para a fabricação de bielas de compressores herméticos.

- i. Calibração: A precisão dimensional pode ser melhorada ao pressionar novamente a peça após a sinterização. A calibração é realizada em matriz específica similar a matriz de compactação, onde a peça é levemente deformada para corrigir as distorções ocorridas durante a sinterização.
- ii. Tratamento termoquímico: Neste caso, as peças sinterizadas e calibradas sofrerão um novo processamento visando aumentar a resistência ao desgaste dos componentes sem causar distorções dimensionais significativas nos mesmos. Os mais utilizados são a oxidação a vapor e a nitretação por plasma.
- iii. Escovação: consiste em escovar o diâmetro interno dos olhais menores da biela com escova de aço para melhorar a topografia da superfície desta região da peça.

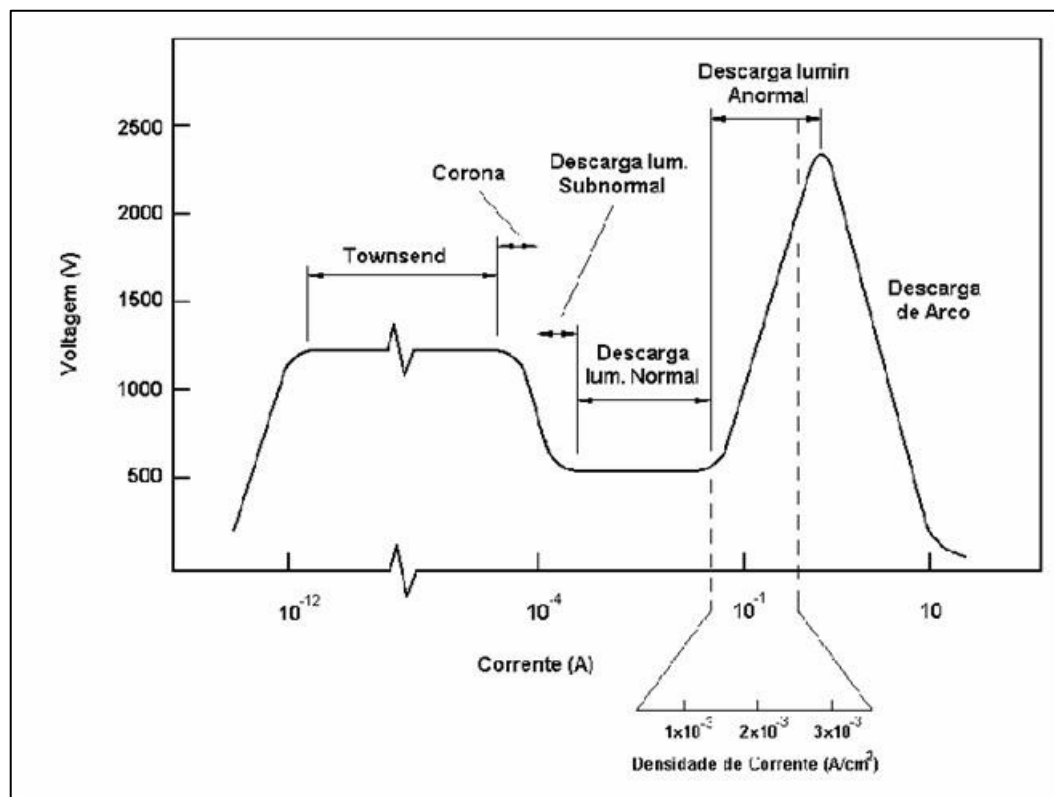
4.3.2 TECNOLOGIA DE PLASMA APLICADA EM MATERIAIS

O conceito de plasma frio segundo (CHAPMAN, 1980) é a de um gás parcialmente ionizado consistindo de um número equivalente de cargas positivas e negativas, e de um diferente número de átomos ou moléculas neutras não ionizadas. Estes plasmas possuem um grau de ionização em torno de 10^{-4} a 10^{-5} , isto é, 1 íon para cerca de 10 a 100 mil átomos ou moléculas neutras.

4.3.2.1 Descargas elétricas

As descargas elétricas podem ser obtidas, dentre outras maneiras, através da aplicação de uma diferença de potencial entre dois eletrodos num meio contendo gás sob baixa pressão, produzindo com isto a sua ionização. Estas descargas comportam-se de forma diferente em função dos parâmetros do processo, podendo ser classificadas nos regimes (CHAPMAN, 1980); (JONES, MARTIN, STRUGES, & HUDIS, 1975), conforme esquematizados na Figura 4.15.

Figura 4.15 - Curva característica corrente-tensão dos regimes de descarga elétrica.



Fonte: (CHAPMAN, 1980)

Descrição dos diferentes tipos de descargas:

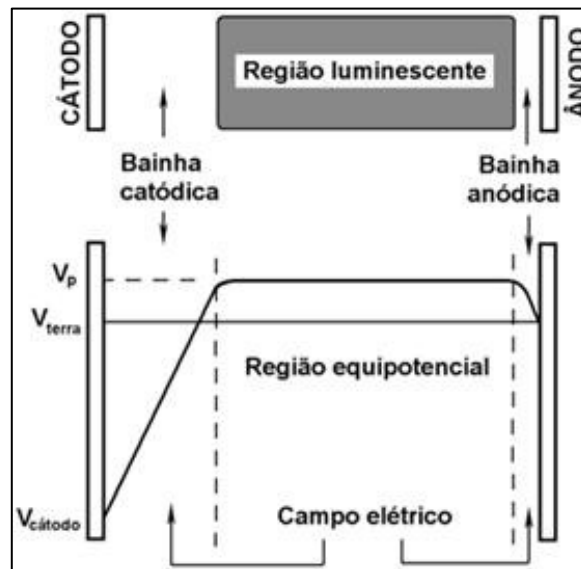
- Descargas de Townsend, Corona e Subnormal: processamento em correntes muito baixas sendo geralmente utilizadas para tratamento de produtos de indústrias têxteis, em sementes, entre outras
- Descarga Luminescente Normal: caracterizada pelo aumento da corrente em tensão constante. Esta descarga possui a característica de não envolver totalmente o cátodo, sendo que este fato na maioria dos casos inviabiliza processamentos de materiais devido a não uniformidade do plasma;
- Descarga Luminescente Anormal: nesta descarga a corrente é elevada em proporcionalidade em relação à tensão. Sua principal característica é o envolvimento uniforme pelo plasma em todo o cátodo, possibilitando com isto um tratamento homogêneo de materiais;
- Descarga de Arco: neste regime a corrente possui comportamento inverso da tensão, ou seja, à medida que se reduz a tensão a corrente tende a valores cada vez maiores, provocando um grande aquecimento;

4.3.2.2 Descarga elétrica no regime anormal

Uma forma de plasma frio, ou pouco ionizado, denominado descarga elétrica luminescente em regime anormal, permite a aplicação de energia sobre a superfície de materiais promovendo o seu aquecimento em um arranjo cátodo-ânodo sob baixa pressão e atmosfera controlada.

Quando uma tensão negativa, da ordem de -500 V é aplicada ao cátodo, a distribuição de potencial elétrico entre os eletrodos assume a configuração da figura 4.16, onde a queda de potencial se concentra nas proximidades do cátodo, dando origem a um acentuado campo elétrico, em uma região denominada bainha catódica. Nas pressões típicas de trabalho, íons fortemente acelerados neste campo dão origem a um fluxo contínuo de partículas, neutras e ionizadas, que impactam contra o cátodo com alta energia promovendo aquecimento e reações no mesmo. Destes impactos, entre outros fenômenos, resultam elétrons ejetados que, por sua carga negativa, são repelidos pelo campo elétrico e acelerados ao encontro de átomos ou moléculas neutras do gás, produzindo novos fenômenos de ionização que auxiliam na manutenção da descarga. Além disso, são também responsáveis pelos fenômenos de excitação/relaxação que conferem luminescência ao plasma (JONES, MARTIN, STRUGES, & HUDIS, 1975)

Figura 4.16 - Distribuição de potencial elétrico



Fonte: (JONES, MARTIN, STRUGES, & HUDIS, 1975)

A câmara do vácuo é convenientemente preenchida com gases que, por suas propriedades físicas, facilitam o aquecimento (como o argônio) e auxiliam nos processos de limpeza e redução de óxidos (como o hidrogênio). Espécies que se formam no campo elétrico próximo ao cátodo proporcionam um ambiente muito reativo, com uma eficiência superior na produção das reações desejadas se comparado a outras onde, mantidas as demais condições, estejam presentes os mesmos elementos químicos na atmosfera em seus estados fundamentais.

Um problema relacionado com esta tecnologia é a eventual entrada da descarga em regime de arco. A utilização de alimentação com tensão contínua pulsada e cuidados especiais com a arquitetura interior do sistema são as medidas frequentemente tomadas para a minimização deste fenômeno indesejável.

4.3.3 NITRETAÇÃO POR PLASMA

A nitretação é um processo de endurecimento superficial de aços e ligas metálicas através da incorporação de átomos de nitrogênio no material submetido ao tratamento. Existem três tipos de processos de nitretação de peças utilizados industrialmente: a nitretação líquida com sais fundidos, a gasosa com amônia e a que utiliza plasma contendo nitrogênio como meio nitretante.

O processo conhecido como nitretação iônica, nitretação em descarga luminosa ou nitretação por plasma, foi patenteado em 1931 por J.J. Egan nos EUA e em 1932 por Berghaus na Alemanha, mas somente em 1960 teve início o seu uso comercial.

A adoção do processo por grandes companhias automotivas indica que esse é um dos principais processos de endurecimento de superfícies da atualidade. Companhias como a Rolls Royce, Pilkington e Volkswagen, Peugeot, Citroën e Renault, através de seus fornecedores, utilizam este processo para tratamento de suas peças. No Brasil, a técnica ainda não é muito conhecida no meio empresarial como também entre metalurgistas engenheiros de materiais, tornando sua divulgação restrita em maior parte a pesquisas e desenvolvimentos em universidades, sendo que este quadro está sendo melhorado cada vez mais.

A nitretação via plasma apresenta uma série de vantagens com relação aos processos de nitretação líquida e gasosa, sendo as mais importantes:

- Redução no tempo de tratamento;
- Ausência de resíduos poluentes;
- Menores consumos de gás e energia;
- Facilidade de controle das variáveis do processo;
- Menor risco de alteração dimensional da peça;

Em componentes sinterizados, que possuem poros residuais como consequência do seu processo de fabricação, os processos convencionais de nitretação não se apresentam adequados. No caso da nitretação líquida, ocorre retenção de sais nos poros que na maioria das vezes são altamente indesejáveis, principalmente pelo fato de serem exsudados durante o uso do componente, acarretando desgaste abrasivo. Já na nitretação gasosa ocorre a formação de precipitados de nitretos de ferro nos contornos dos poros (ao longo dos poros comunicantes) com consequente fragilização e distorções dimensionais nos componentes.

Tanto a retenção de resíduos como a formação de camada composta na superfície interna dos poros não é observada na nitretação por plasma, o que torna este processo o mais adequado para a nitretação de ferro ou aço sinterizado.

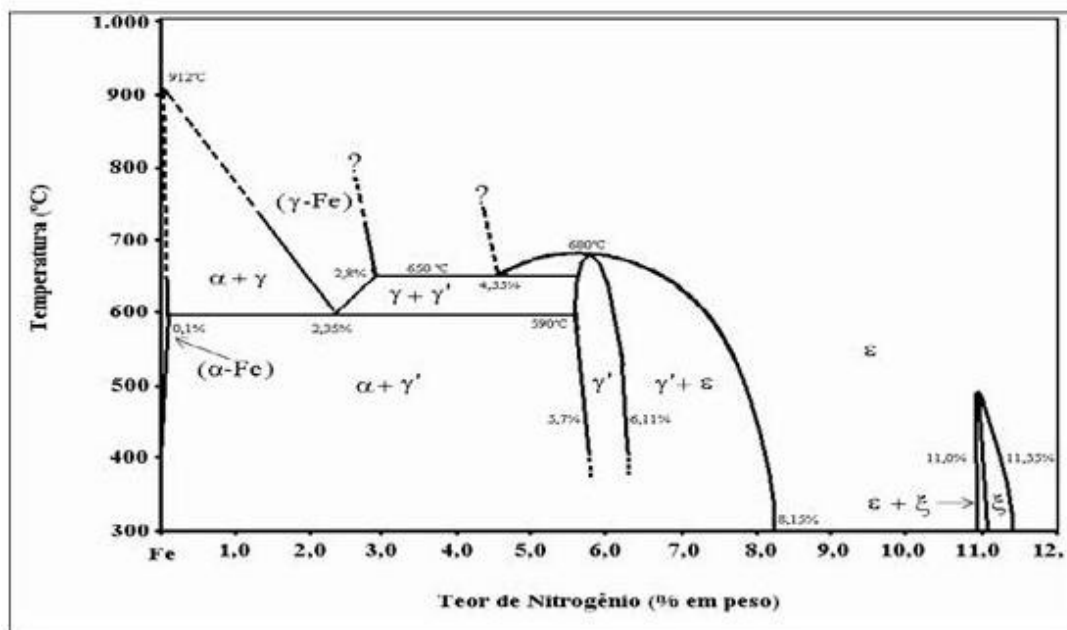
O processo de nitretação por plasma consiste em submeter a peça à uma descarga elétrica, numa mistura de gases contendo nitrogênio, a baixa pressão, de modo que o cátodo da descarga seja a própria peça a ser tratada. Com a descarga, elétrons são acelerados formando uma série de espécies químicas, principalmente íons de nitrogênio, que possuem energia suficiente para produzir a ativação e a nitretação da superfície da peça. Os nitretos formados nas camadas superficiais e sub-superficiais modificam as propriedades químicas, mecânicas e tribológicas dos componentes.

Os elementos de liga presentes nos aços contribuem consideravelmente na modificação das propriedades obtidas após o tratamento de nitretação. Os elementos que apresentam maior influência na formação da camada nitretada são aqueles com maior afinidade química com o nitrogênio, tais como Al, Ti, Cr, Mo, Si, Mn e V.

4.3.3.1 Diagrama de Fases Fe-N

A importância prática dos diagramas de equilíbrio Fe-N e Fe-N-C é a compreensão das transformações de fase que ocorrem nas superfícies dos aços durante o processo de nitretação na medida em que se altera o teor de nitrogênio e carbono na mesma, conforme mostra o diagrama de equilíbrio Fe-N da Figura 4.17 (METALS HANDBOOK, 1973), (JACK & JACK, 1973).

Figura 4.17 - Diagrama de equilíbrio Fe-N



Fonte: (METALS HANDBOOK, 1973)

Descrição das principais fases presentes no diagrama de equilíbrio Fe-N:

- Fase Fe-α (Cúbica de Corpo Centrado): solução sólida contendo pouco nitrogênio com um limite máximo de solubilidade de 0,10% em peso a 590°C. Com a redução da temperatura para 100°C, a solubilidade reduz para aproximadamente 0,001% em peso (METALS HANDBOOK, 1973); (HANSEN, 1958).

- Fase Fe- γ (Cúbica de Face Centrada): solução sólida estável acima de 590°C, com um limite máximo de solubilidade de 2,8% de nitrogênio em peso a 650°C (METALS HANDBOOK, 1973);
- Fase Fe₄N- γ' (Cúbica de Face Centrada): fase presente numa pequena faixa estequiométrica, situando-se entre 5,7 e 6,11%, em peso de nitrogênio a 450°C, e com estabilidade térmica até 680°C (METALS HANDBOOK, 1973), (JACK & LIGHTFOOT, 1973)
- Fase Fe₂₋₃N- ϵ (Hexagonal Compacta): pode apresentar nitrogênio em uma faixa ampla, dissolvendo no máximo cerca de 11,10%, em peso, para temperaturas inferiores a 500°C (HANSEN, 1958). O menor limite de solubilidade de nitrogênio nesta fase foi encontrado a 700°C, sendo inferior ao encontrado na fase γ' (METALS HANDBOOK, 1973);
- Fase Fe₂N- ξ - (Ortorrômbica de Face Centrada): presente numa estreita faixa estequiométrica de 11,10 a 11,30%, em peso, de nitrogênio (quantidade máxima de nitrogênio observada no diagrama Fe-N), sendo estável entre, aproximadamente, 320 a 500°C (METALS HANDBOOK, 1973);

A Tabela 4.2 resume as principais características das fases do sistema Fe-N. (JACK & LIGHTFOOT, 1973).

Tabela 4.2 - Fases do sistema Fe-N abaixo da temperatura eutetóide.

Fase	Estequiometria	N (% em massa)	Estrutura	Parâmetros de rede (Å)
α	Fe	0,10 max. a 590°C	CCC	a = 2,8864
γ'	Fe ₄ N	5,77-5,88 a 500°C	CFC	a = 3,795
ϵ	Fe ₂₋₃ N	7,5-11,0 a 500°C	HC	a = 2,764*; c/a = 1,599
ξ	Fe ₂ N	11,14	OFC	a = 5,53; b = 4,48; c = 4,25

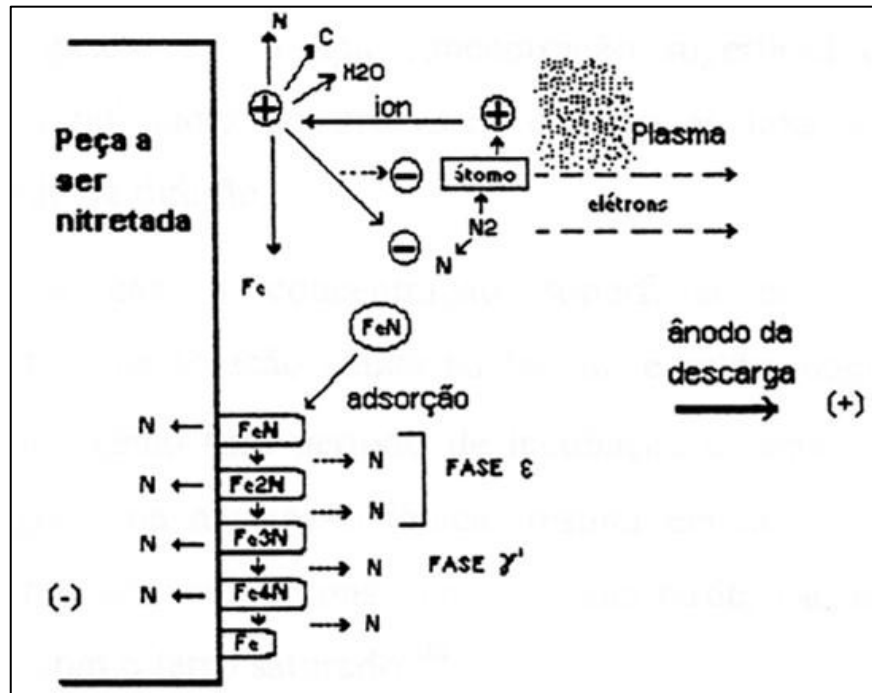
* parâmetro de rede para célula unitária na composição limite Fe₂N

Fonte: (JACK & LIGHTFOOT, 1973)

4.3.3.2 Mecanismo do Processo de Nitretação por Plasma

Muitos estudos têm sido realizados com o objetivo de elucidar os mecanismos de formação e cinética de crescimento da camada nitretada no tratamento por plasma. O modelo mais aceito é o proposto por Kolbel e ratificado por Edenhofer que está apresentado na figura 4.18.

Figura 4.18 - Formação e cinética de crescimento da camada nitretada



Fonte: (EDENHOFER, 1974).

Os átomos de Fe pulverizados da superfície combinam-se com o nitrogênio ativo do plasma formando FeN. Os nitretos formados são retroespalhados, devido às colisões no material pulverizado com as partículas do gás e se condensam na superfície do cátodo. Esses nitretos são instáveis na temperatura em que se encontra o cátodo (350 - 600 °C) e se decompõem em nitretos com menor teor de nitrogênio (Fe₂N, Fe₃N, Fe₄N). (EDENHOFER, 1974)

Parte do nitrogênio que é liberado neste processo irá se difundir na estrutura do material e parte voltará novamente ao plasma. Portanto, o crescimento da camada superficial de nitretos depende da capacidade da rede cristalina em adsorver o nitrogênio, e da repulverização dos nitretos formados na região do cátodo, que se acumulam durante o tempo de tratamento (EDENHOFER, 1974)

O nitreto de ferro, depositado pela retropulverização e adsorvido na superfície, ao decompor-se, aumenta a concentração de nitrogênio, produzindo um gradiente de concentração na interface (camada alterada - substrato base), o qual promoverá um fluxo de matéria desta região para as camadas interiores. Além disso, durante o bombardeamento iônico, os átomos do topo da superfície são continuamente removidos deixando vazios interatômicos. Conjuntamente, um grande número de lacunas e interstícios migra do corpo do substrato para superfície. Assim, a região superficial encontra-se em estado de alta mobilidade atômica e vibracional favorecendo a difusão de átomos em solução intersticial e substitucional (EDENHOFER, 1974)

4.3.3.3 Endurecimento superficial

As características superficiais dos componentes fabricados em ferro puro e aços influenciam algumas de suas propriedades como, resistência à fadiga, coeficiente de atrito, resistência ao desgaste, resistência à corrosão, entre outras. Estas propriedades podem ser modificadas em função das necessidades, ou seja, da especificação técnica do componente requerida pela aplicação específica. Uma forma de alteração destas propriedades superficiais são os tratamentos termoquímicos, como por exemplo, a nitretação, cementação, oxidação, entre outros. Estes tratamentos têm por objetivo alterar as propriedades superficiais dos componentes, promovendo o endurecimento e a passivação da superfície através da modificação da composição química e/ou microestrutural do material mantendo inalteradas as propriedades do núcleo.

4.3.3.4 Mecanismos de endurecimento por plasma

Os mecanismos de endurecimento envolvidos no processo de nitretação por plasma, são basicamente: o endurecimento por precipitação e por solução sólida.

- **Endurecimento por precipitação.**

O endurecimento por precipitação é a base de tratamentos térmicos utilizados em ligas leves, bem como, em alguns tipos de aços. Este tratamento aproveita a propriedade de certos elementos químicos de se dissolverem na matriz do material formando soluções sólidas supersaturadas que, em determinadas condições, precipitam compostos no interior da matriz, na forma de partículas, placas ou agulhas (segunda fase precipitada). Os compostos formados durante a nitretação a plasma são geralmente nitretos-carbonitretos de ferro ou dos elementos de liga presentes na liga que está sendo tratada. A formação dos precipitados depende de

parâmetros como a temperatura, o tempo de tratamento, tipo de liga tratada e porcentagem de nitrogênio no processo. O nitrogênio se dissolve nos interstícios octaédricos do ferro alfa, conforme expressa o diagrama de fases Fe-N (Figura 3.18), para temperaturas usuais de nitretação. O nitrogênio pode ser dissolvido no ferro até concentrações de 0,1% em peso. Quando este teor de nitrogênio é alcançado, precipitam nitretos γ' , de composição estequiométrica Fe_4N . Este nitreto de estrutura cristalina cúbica de faces centradas é estável abaixo de 680°C (CHIAVERINI, 1984). Se as concentrações de nitrogênio excedem 6% os nitretos γ' começam a mudar para nitretos tipo ϵ , de composição estequiométrica Fe_xN ($2 < x < 3$). Estes nitretos apresentam célula unitária hexagonal. Abaixo de 500°C nitretos ξ começam a se formar. O teor de nitrogênio desta fase está em torno de 11%, e sua composição estequiométrica é Fe_2N , com uma estrutura cristalina ortorrômbica (DIETER, 1988), (LIGHTFOOT & JACK, 1973).

- **Endurecimento por solução sólida**

A introdução de átomos de soluto em solução sólida em uma rede de átomos de solvente produz uma liga com maior dureza que o material original. Dependendo da relação entre o tamanho dos átomos de soluto e solvente, ocorrem dois tipos de solução sólida: substitucional e intersticial (CHIAVERINI, 1984).

Na solução sólida substitucional os átomos de soluto possuem tamanho similar aos átomos do solvente ocupando sítios da rede que normalmente deveriam estar preenchidos por átomos do solvente. Se a diferença de tamanho dos átomos de solvente é inferior a 15% em volume, o fator de tamanho é favorável para que ocorra a solução sólida substitucional, sendo que diferenças maiores que este valor reduz a 1% a formação de solução sólida substitucional (CHIAVERINI, 1984).

O principal mecanismo de endurecimento utilizado pela nitretação a plasma é a formação de uma zona de difusão com nitrogênio em solução sólida e finos precipitados de nitretos. Além de proporcionar o aumento de resistência através da distorção do reticulado e modificação do parâmetro de rede, obtém-se um aumento significativo na capacidade de sustentação de carga do material, possibilitando a utilização de (revestimentos ou filmes) com maior eficiência.

4.3.3.5 Estrutura da Camada Nitretada

- A camada de compostos

A camada, ou zona de compostos é a região onde precipitam predominantemente os nitretos-carbonitretos de ferro. Também conhecida como camada branca devido ao fato de ser inerte ao ataque de reagentes químicos (e apresentar cor branca ao microscópio ótico), é formada na região mais superficial do material. A zona de compostos pode ser uma mistura de nitretos (carbonitretos) do tipo ϵ e γ' , podendo ser formada por apenas uma das fases de nitretos ou pelas duas simultaneamente. Para que a mesma exista é necessário que sejam atingidas as condições críticas para que ocorra a precipitação dos nitretos (tempo, temperatura e potencial de nitrogênio); sendo que quando satisfeitas, o primeiro nitreto a ser formado é o γ' -Fe₄N (DIETER, 1988), (LIGHTFOOT & JACK, 1973).

Para a formação do nitreto ϵ , é necessário o aumento do potencial de nitrogênio (pode ser obtido através do aumento do teor de N₂ e adicionando baixos teores de CH₄ na mistura gasosa). Na prática, a fase γ' não ocorre sempre nas condições esperadas. Mesmo com potencial de nitrogênio elevado o suficiente, pode se obter na superfície uma camada de nitretos tipo ϵ e, não necessariamente, haverá uma camada interna de nitretos do tipo γ' . Segundo Lightfoot e Jack, isto ocorre porque sendo a concentração de nitrogênio na interface gás/camada superficial de nitretos ϵ muito elevada, o gradiente de concentração na interface entre a fase ϵ e a matriz também é muito elevado (LIGHTFOOT & JACK, 1973).

Existe uma região na interface gás/camada mais superficial de nitretos ϵ onde a fase γ' é termodinamicamente estável. Entretanto, se o nitrogênio for rapidamente consumido pela fase ϵ antes que a fase γ' tenha tempo de nuclear, não observaremos desta maneira a formação da fase γ' . Deste modo, a formação da fase γ' ocorrerá sempre que o gradiente de concentração de nitrogênio cair abaixo da concentração crítica para a formação do nitreto ϵ , ou porque a concentração é baixa ou porque a camada atingiu uma determinada espessura (CHIAVERINI, 1984).

Com a coexistência de ambas as fases na camada de compostos, tem-se a denominada camada de fase dupla, sendo a mesma indesejável por possuir algumas características que a tornam mais susceptível à fratura. Ambas as fases apresentam fraca adesão uma em relação à outra, e ainda possuem diferentes coeficientes de expansão térmica. Deste modo, camadas que são invariavelmente espessas ou que são submetidas a variações de temperatura em serviço estão sujeitas a falhas (DIETER, 1988), (LIGHTFOOT & JACK, 1973).

A porosidade da camada de compostos pode ser considerada como outro mecanismo para enfraquecimento desta. Em sua camada mais externa forma-se uma região porosa associada às altas pressões envolvidas na recombinação de N atômico para formação de nitrogênio molecular (N_2). Por este mecanismo a camada porosa pode ocorrer em qualquer meio de reação (ROCHA A. S., 2000); (CHIAVERINI, 1984).

A espessura e a composição da camada de compostos devem ser selecionadas previamente, conforme as condições de operação do componente nitretado. A camada ϵ é adequada para aplicações de resistência ao desgaste livres de choques ou altas tensões localizadas. A camada γ' é tenaz e mais adequada para situações com carregamentos mais severos (ROCHA A. S., 2003).

De uma maneira geral, a utilidade da camada de compostos pode ser atribuída, principalmente a dois fatores.

O primeiro é a homogeneidade, onde deve ser monofásica, ou seja, composta por somente um tipo de nitreto. Se a camada for composta por γ' e ϵ , serão criadas altas tensões entre as diferentes estruturas nas regiões de transição, podendo gerar microtrincas se a peça for solicitada externamente.

O segundo é a espessura da camada, devendo ser a menor possível para se obter a necessária resistência ao desgaste e à corrosão.

Na nitretação por plasma é possível o controle da estequiometria dos nitretos para se obter uma camada monofásica ou até mesmo se evitar a formação da camada branca, por se ter um controle mais preciso dos parâmetros do processo. A escolha da espessura e da composição da camada deve ser realizada previamente de acordo com as condições de operação do componente que está sendo nitretado.

- A zona de difusão

A zona de difusão de nitrogênio pode ser entendida como a matriz de ferro com nitrogênio em solução sólida e finos precipitados de nitretos (carbonitretos) de ferro ou dos elementos de liga presentes no material. (HEUMANN, 1989). Para matrizes ferrosas, o nitrogênio fica em solução sólida até que o limite de solubilidade seja alcançado. A partir daí pode começar a nucleação e crescimento dos precipitados. Normalmente os tempos para nitretação a plasma são reduzidos, o que evita um crescimento excessivo dos precipitados (endurecimento por precipitação). A profundidade de difusão depende do gradiente de concentração de nitrogênio, do tempo de tratamento, da temperatura e da composição química

da peça (FROELICH, 2003). A concentração de nitrogênio aumenta em direção à superfície da peça, deste modo precipitados coerentes bastante finos são formados quando se excede o limite de solubilidade do nitrogênio na matriz. Os precipitados formados são fases de elevada dureza, e sua precipitação ainda provoca uma distorção da rede cristalina, o que promove um maior efeito em aumento de resistência.

4.4 TOPOGRAFIA E TRIBOLOGIA DE CAMADAS NITRETADAS.

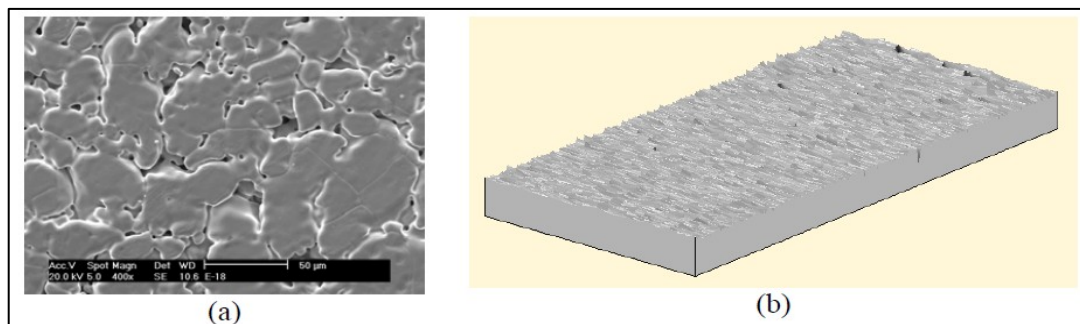
Neste item irá considerar dois aspectos extremamente relevantes para o desempenho tribológico de componentes. A variação topográfica e ensaios de resistência ao desgaste em tribômetro, de camadas nitretadas com as fases ϵ e γ' .

4.4.1 TOPOGRAFIA DE CAMADAS NITRETADAS COM FASES ϵ e γ'

Em sua dissertação de mestrado BINDER, C. (BINDER, 2006), produziu e avaliou camadas nitretadas tanto com a fase ϵ , quanto com a fase γ' , em bielas de compressor hermético fabricadas por Metalurgia do Pó em ferro puro.

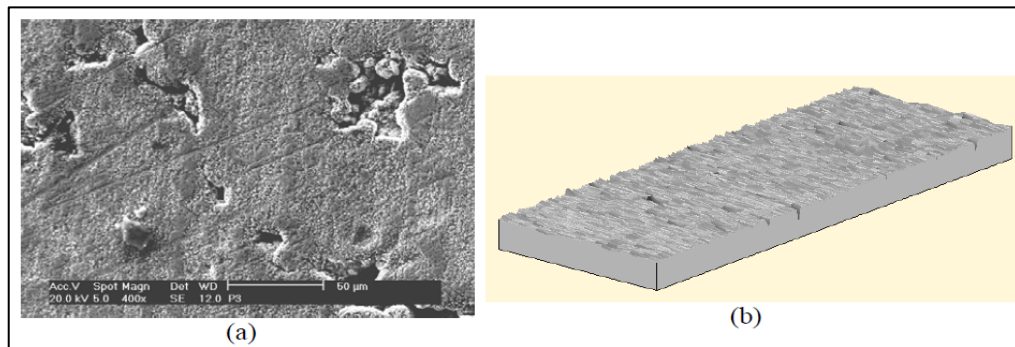
As peças com as duas fases de nitreto foram caracterizadas quanto à topografia e resistência ao desgaste. As figuras 4.19, 4.20, 4.21, mostram os aspectos topográficos, com imagens de MEV e interferômetro a laser.

Figura 4.19 - Topografia da superfície original; (a) via MEV; (b) por interferometria a laser.



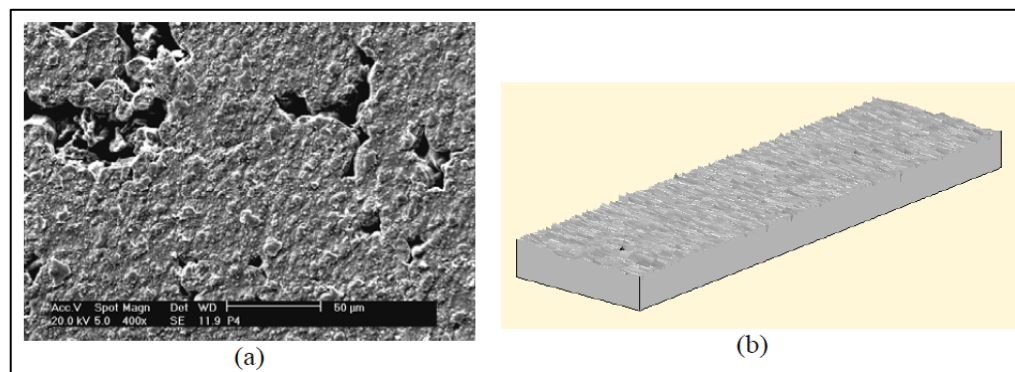
Fonte: (BINDER, 2006)

Figura 4.20 - Topografia da superfície nitretada da amostra γ' ; (a) via MEV; (b) por interferometria a laser



. Fonte: (BINDER, 2006)

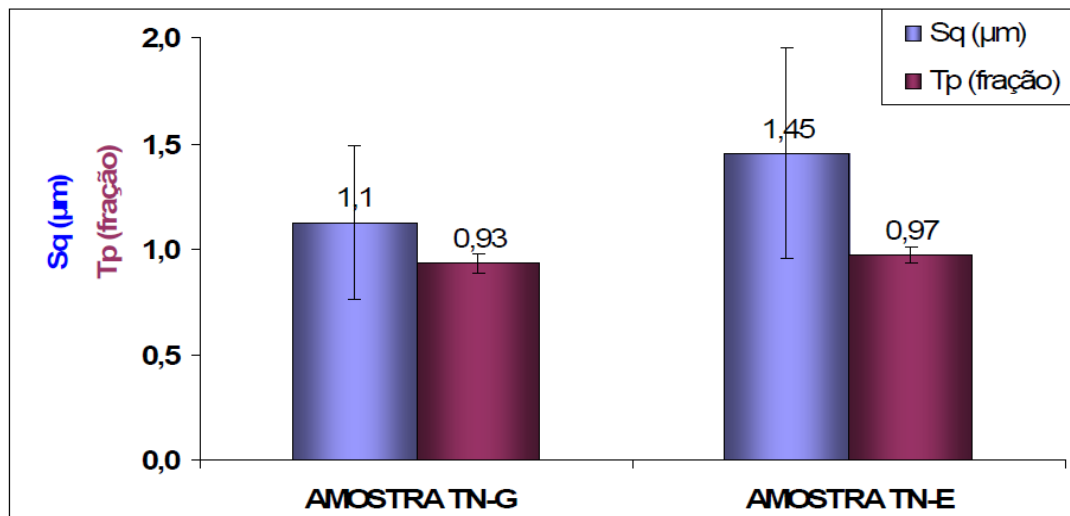
Figura 4.21 - Topografia da superfície nitretada da amostra ϵ ; (a) via MEV; (b) por interferometria a laser.



. Fonte: (BINDER, 2006)

Conclui o autor (BINDER, 2006), através da análise dos parâmetros estatísticos, rugosidade quadrática média das superfícies (S_q) e curva da fração de apoio (T_p), que a topografia das amostras após a nitretação com fase ϵ e γ' são estatisticamente equivalentes, apesar dos valores médios indicarem que a fase γ' gera uma superfície menos afetada pelo processo, figura 4.22.

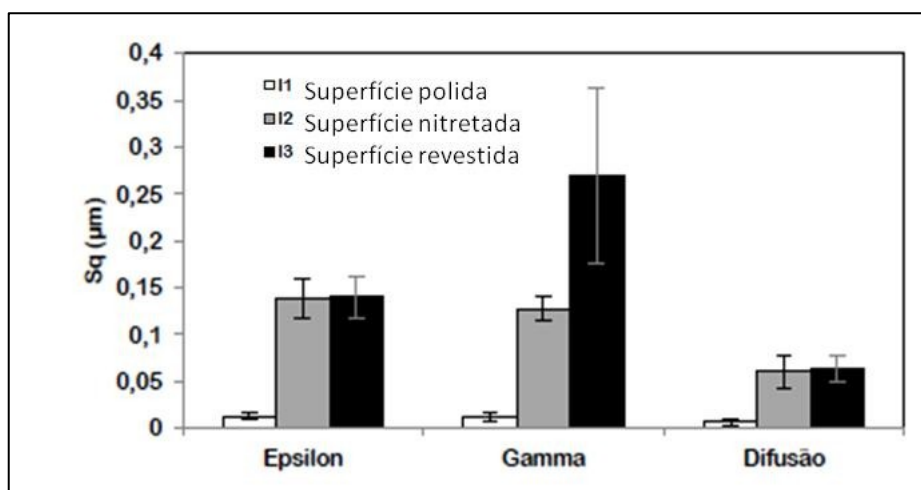
Figura 4.22 - Parâmetros que caracterizam a superfície nitretada nas condições TN-G (γ') e TN-E (ϵ).



. Fonte: (BINDER, 2006)

Shioga (Shioga, 2013) em sua dissertação de mestrado, aplicando as mesmas condições de nitretação do trabalho anterior para obtenção de fases γ' e ϵ , chegou às mesmas conclusões com relação à rugosidade quadrática média das superfícies (Sq) nitretadas, figura 4.23.

Figura 4.23 - Evolução de Sq para cada camada ao longo do processo



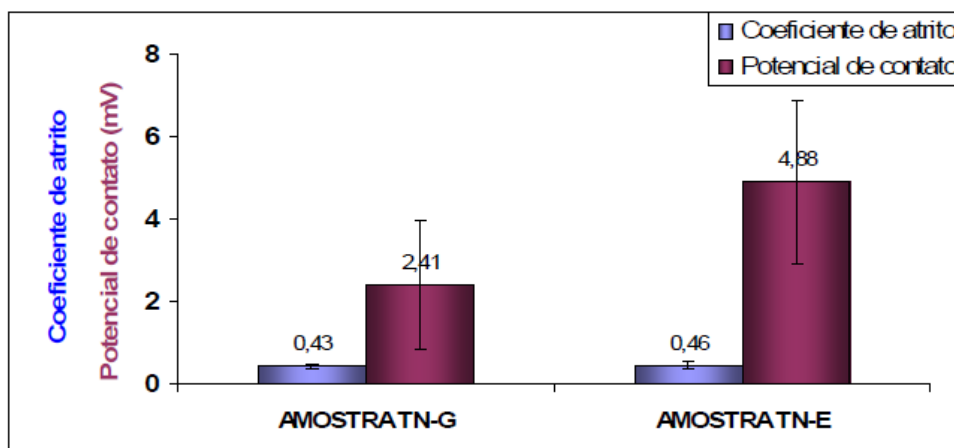
. Fonte: (Shioga, 2013)

4.4.2 RESISTÊNCIA AO DESGASTE, EM TRIBÔMETRO, DAS FASES ϵ E γ' .

Binder (BINDER, 2006) através de testes de deslizamento alternado em tribômetro avaliou as características tribológicas das fases de nitretos ϵ e γ' em bielas de compressor hermético fabricadas por Metalurgia do Pó em ferro puro.

Os resultados das medições do coeficiente de atrito e do potencial de contato são apresentados da figura 4.24. Verifica-se que não há diferença entre o coeficiente de atrito das duas fases de nitreto.

Figura 4.24 – Coeficiente de atrito e potencial de contato médio das amostras TN-G (γ') e TN-E (ϵ)

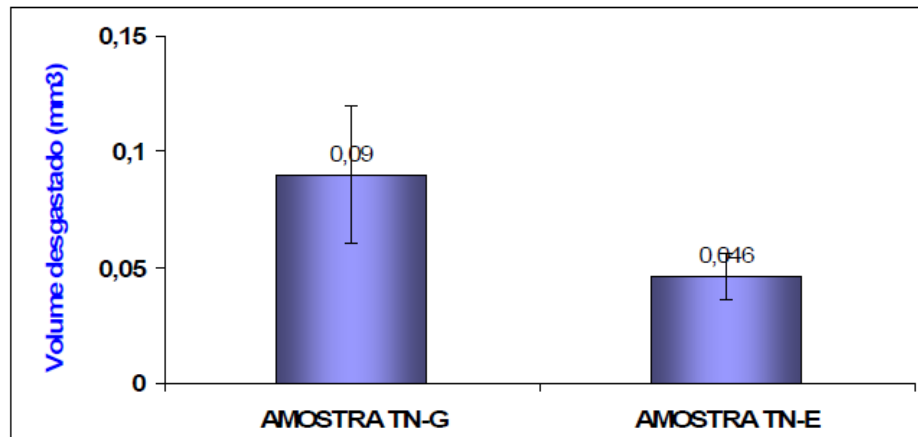


. Fonte: (BINDER, 2006)

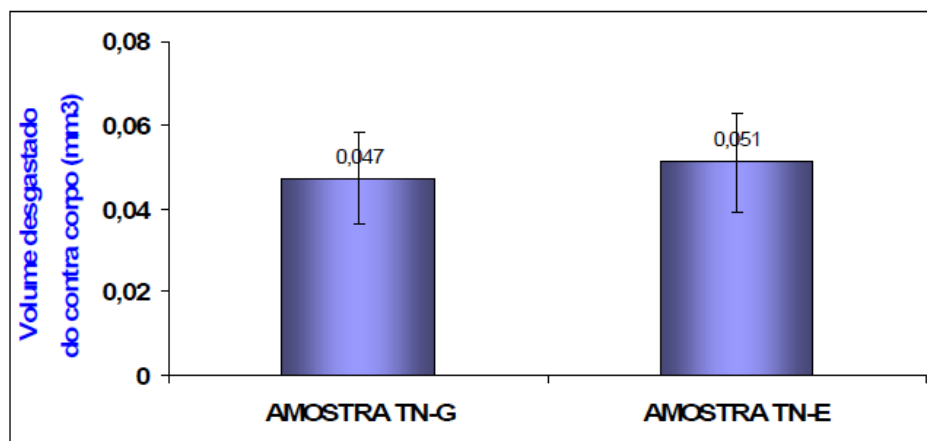
Outra informação relevante, obtida através das imagens em 3D geradas com o interferômetro a laser, são as medições do volume desgastado após o teste de deslizamento alternado.

A figura 4.25, apresenta os volumes de desgaste das amostras nitretadas com as fases ϵ e γ' . A camada nitretada com a fase γ' apresenta um volume desgastado ($0,09 \text{ mm}^3$) duas vezes maior que a camada nitretada com a fase ϵ ($0,046 \text{ mm}^3$).

Quando medido o volume desgastado do contra-corpo, percebe-se que a fase γ' , apesar de desgastar mais, agride muito menos o contra-corpo. A figura 4.26 mostra que o contra-corpo da fase γ' desgastou menos ($0,047 \text{ mm}^3$), que o contra corpo da fase ϵ ($0,051 \text{ mm}^3$), ao menos na tendência média, uma vez que estatisticamente os valores são idênticos.

Figura 4.25 – Volume desgaste médio das amostras TN-G (γ') e TN-E (ϵ)

. Fonte: (BINDER, 2006)

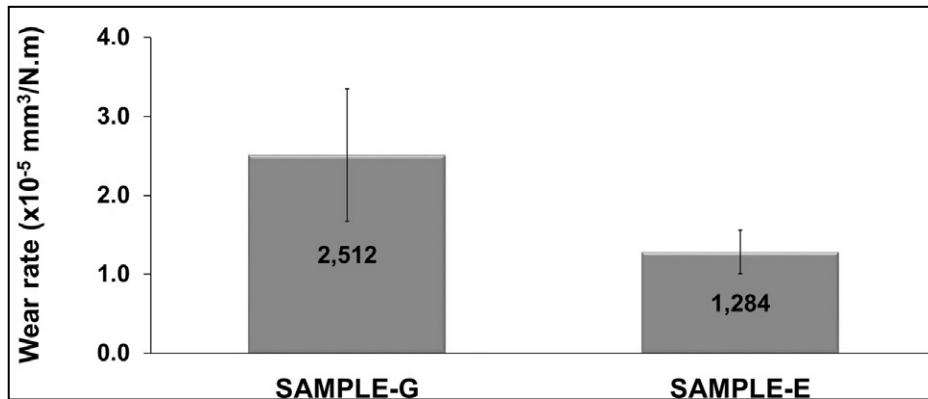
Figura 4.26 – Volume desgaste do contra corpo (esfera) TN-G (γ') e TN-E (ϵ)

. Fonte: (BINDER, 2006)

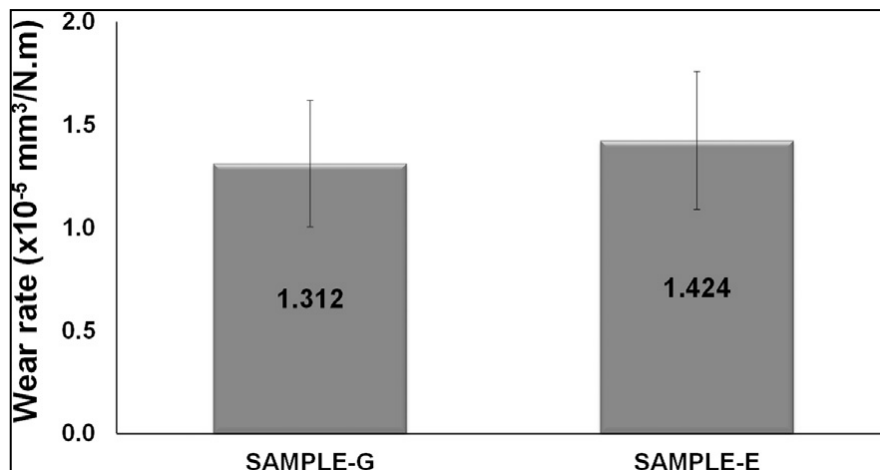
Binder, C. et al (C. BINDER, 2015), aprofundaram a avaliação tribológica das camadas nitretadas com as fases γ' e ϵ , apresentando a taxa de desgaste obtida em testes de deslizamento alternado. A determinação da taxa de desgaste é um resultado mais efetivo para avaliação tribológica de um par de materiais em contato do que simplesmente a medição final do volume desgastado.

As figuras 4.27 e 4.28 apresentam os valores da taxa de desgaste das camadas nitretadas e dos seus contra corpos, respectivamente.

Podemos verificar que a taxa de desgaste da fase γ' é praticamente o dobro que a taxa de desgaste da fase ϵ . Para os contra corpos, vê-se que a fase γ' causa uma taxa de desgaste levemente menor do que a fase ϵ , mas que estatisticamente são iguais.

Figura 4.27 – Taxa de desgaste das amostras SAMPLE-G (γ') e SAMPLE-E (ϵ)

Fonte: (C. BINDER, 2015)

Figura 4.28 – Taxa de desgaste do contra corpo (esfera) SAMPLE-G (γ') e SAMPLE-E (ϵ)

Fonte: (C. BINDER, 2015)

Considerando os aspectos topográficos e tribológicos envolvendo camadas de nitretos com as fases γ' e ϵ , resume-se os resultados identificados nesta revisão.

1 – Nitretar componentes ferrosos com a fase γ' e fase ϵ produz a mesma topografia superficial.

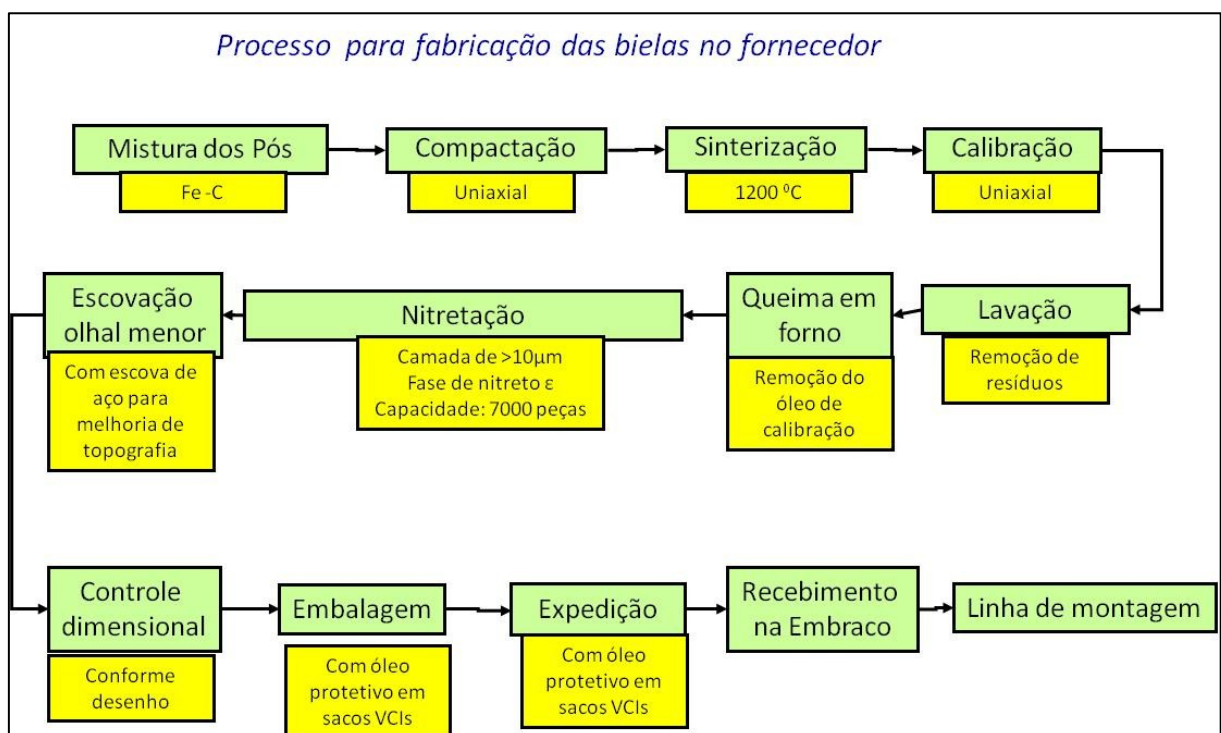
2 – Uma camada de nitretos formada pela fase γ' apresenta um volume desgastado e uma taxa de desgaste duas vezes maior que uma camada formada pela fase ϵ .

3 – O volume desgastado e a taxa de desgaste dos contra corpos são equivalentes, sendo a camada nitretada formada pelas fases γ' ou ϵ .

4.5 FLUXO DE FABRICAÇÃO DE BIELAS PARA COMPRESSORES HERMÉTICOS

O processo atual de fabricação das bielas segue o fluxo de etapas apresentado na figura 4.29. As etapas descritas servirão de base para a proposta de desenvolvimento de uma nova especificação de camada nitretada, com simplificação do processo e aumento de produtividade, objetivos deste trabalho.

Figura 4.29 – Fluxo do processo atual para fabricação de bielas.



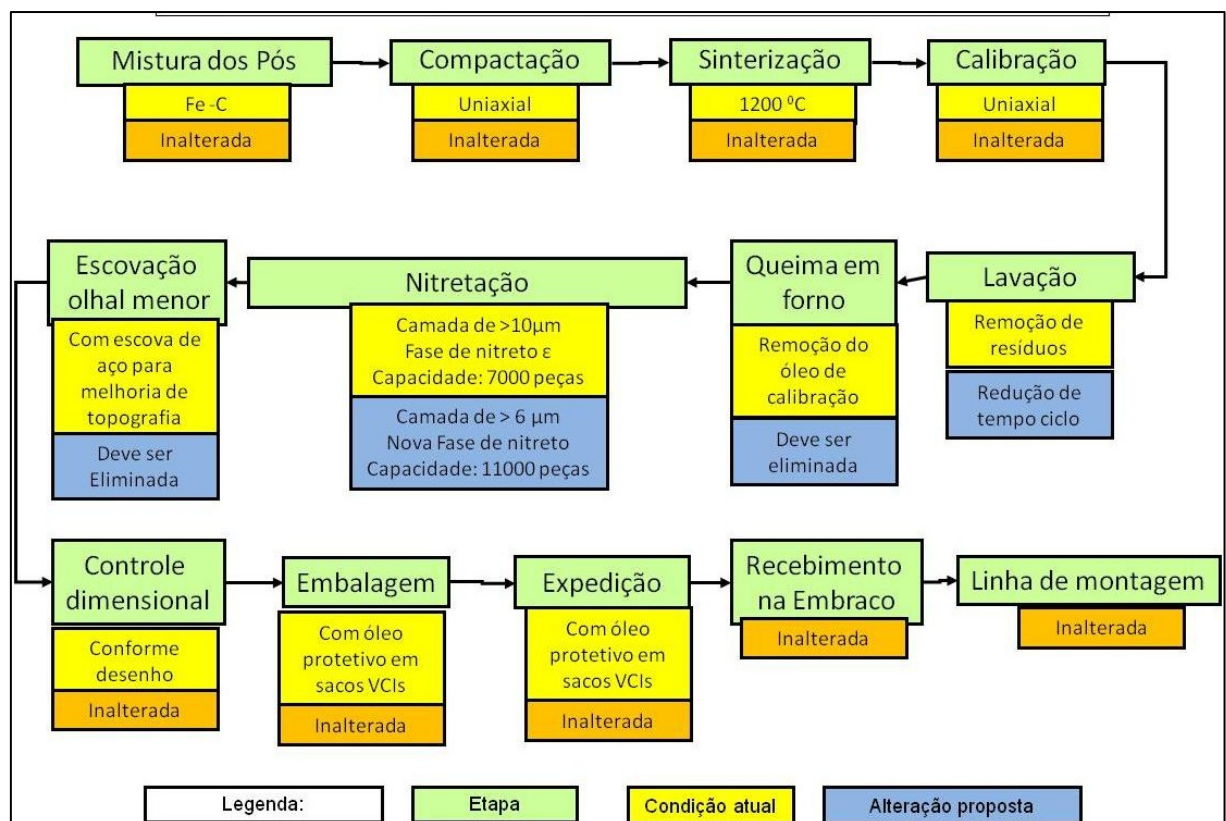
Fonte: autoria própria

5 PROPOSTA E METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

Este tema teve como objetivo principal desenvolver uma nova especificação, com maior resistência ao desgaste, para o processo de nitretação por plasma aplicado em bielas e olhais menores, componentes integrantes do kit mecânico dos compressores da família EM e EG, respectivamente. Além disso, com a nova especificação almejou-se simplificar o fluxo do processo (eliminar etapas), aumentar a produtividade (capacidade do forno), e garantir resultados de redução de custos.

O esquema da figura 5.1, que representa o fluxo do processo anterior ao presente desenvolvimento, sintetiza e identifica as alterações introduzidas, para a fabricação das bielas com nova camada de nitretos.

Figura 5.1 – Fluxo do processo atual destacando em azul as alterações pretendidas neste trabalho



Fonte: autoria própria

As etapas iniciais de fabricação, Mistura dos Pós, Compactação, Sinterização e Calibração, não foram alteradas, não estando assim, no foco do trabalho.

Um aspecto importante da etapa de calibração é o fato das peças serem mergulhadas em um óleo lubrificante (óleo de calibração) antes da operação de compressão, para redução do atrito entre as peças e a matriz de calibração, e o desgaste do ferramental de calibração. Este óleo de calibração, no entanto, é absorvido por capilaridade por todo o volume das peças que são porosas. Como veremos mais a frente esse óleo de calibração impregnado nas peças necessita ser removido antes da nitretação.

A etapa de Lavação, após a calibração, tem por objetivo a remoção de resíduos insolúveis (partículas e limalhas de ferro) normalmente formados durante a calibração. Atualmente é um processo de agitação manual de um cesto, com aproximadamente 200 bielas, em um tanque com o próprio óleo de calibração, possuindo, pouco controle, mas que atende o objetivo. No entanto as peças ficam com mais resíduos de óleo, além do óleo de calibração absorvido pela capilaridade da rede de poros das peças.

A Etapa de Queima em Forno é normalmente realizada em forno contínuo sob atmosfera protetora e tem por objetivo remover tanto o óleo de calibração impregnado no interior das bielas, como o óleo usado na etapa de lavagem de resíduos, pelo efeito de evaporação térmica e queima do óleo volatilizado no ambiente do forno. Em última instância o óleo é craqueado e as peças normalmente retêm fortes traços de fuligem.

As etapas de Lavação e Queima foram foco deste trabalho. O objetivo neste caso consistiu em:

- a) Otimizar a etapa de lavagem pela adoção de equipamento adequado e uso de fluidos desengraxantes que, além de remover os resíduos insolúveis, maximize a remoção do óleo das peças. A meta consistiu em garantir que após esta lavagem otimizada as peças apresentassem apenas o óleo retido por capilaridade.
- b) Eliminar a etapa de queima das peças em forno. O óleo de calibração retido na porosidade das peças é removido com a tecnologia de reator catodo-anodo, como veremos a seguir.

A etapa de nitretação por plasma na tecnologia anterior ao presente trabalho era configurada para obtenção da fase ϵ , pois utiliza mistura de gases rica em nitrogênio (75% N_2 + 25% H_2) e assume-se que as peças estão isentas de óleo pelo processo de queima em forno. Especificava-se que a camada de nitretos fosse maior que 10 μ m.

A obtenção da nova especificação da camada de nitretos concentrou-se fortemente nesta etapa. Nossos objetivos com relação à fase de nitretação por plasma foram, então, seguintes:

- a) Remover o óleo de calibração retido na porosidade das peças com a configuração catodo-anodo. Esta remoção ocorre durante a fase de aquecimento das peças dentro do reator de nitretação. Nesta configuração volatiliza-se o óleo por efeito térmico e ação do vácuo, no entanto, ele não é queimado. A ação do plasma quebra as cadeias carbônicas longas das moléculas do óleo, transformando-o em gases tipo metano e butano, que são bombeados para fora do reator. Este é o diferencial da tecnologia de “limpeza e nitretação em ciclo único” objeto da Patente citada anteriormente. Como o óleo não é craqueado a presença de fuligem nas peças é nula.
- b) Obtenção de fase de nitretos tipo γ' , utilizando mistura de gases pobres em nitrogênio (25% N_2 + 75% H_2). Além da mistura de gases com baixo teor de N_2 , a formação da fase γ' só é garantida pela total ausência de fuligem nas peças, pois o carbono atua como estabilizador da fase ϵ . A estabilização da fase ϵ pelo carbono é o principal fator que torna praticamente impossível a obtenção de fase pura de γ' nos reatores comerciais de nitretação.
- c) Aumentar a capacidade (produtividade) do reator em torno de 65% (de 4.000 para 7.000 peças/carga). Esta possibilidade advém do uso da mistura pobre em nitrogênio (25% N_2 + 75% H_2) utilizada para obtenção da fase γ' , que é garantida com a ausência de fuligem devido a limpeza por plasma. A potência do plasma é função da massa dos átomos presentes na atmosfera de nitretação, sendo que átomos com maior massa, deste caso o nitrogênio, demandam mais potencia. Como vamos reduzimos o percentual de nitrogênio de 75% para 25%, o plasma demanda muito menos potencia da fonte do equipamento. O segundo fator que define o consumo de potencia é o somatório das superfícies das peças em tratamento e como a mistura pobre deixa o equipamento com “potência ociosa”, podemos aumentar a quantidade peças da carga, resultando em maior produtividade do reator.
- d) O reprojeto do suporte de peças foi necessário para acomodar o aumento da densidade de peças de forma que se mantenha a estabilidade do plasma, se evite a ocorrência de arcos elétricos e catodos ociosos, bem como de gradientes térmicos ao longo da carga, garantindo a repetibilidade da especificação em todas as peças e entre diferentes cargas.

A etapa de escovação realizada após a nitretação é uma opção onerosa que tem por objetivo melhorar a topografia das superfícies internas dos olhais das bielas, pois como já discutido na revisão sobre nitretação, esta piora a topografia das peças. Assim, a eliminação desta etapa, que é gargalo no fluxo produtivo, contribui para a redução de custos no novo processo.

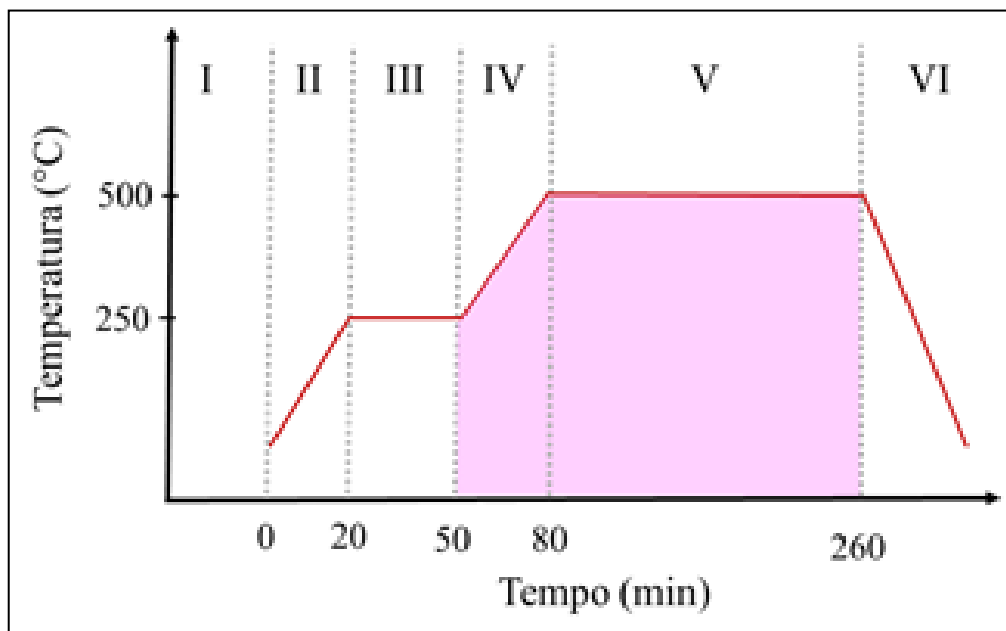
O objetivo de eliminar totalmente esta operação explorou as seguintes possibilidades:

- a) Variar parâmetros do processo como pressão e tensão, garantindo a formação da fase γ' , evitando a piora dos parâmetros topográficos que ocorrem na nitretação.
- b) Introduzir uma camada de oxidação (oxinitretação) sobre a camada de nitretos, mas sem aumentar o tempo de ciclo do processo.

As etapas de controle dimensional e microestrutural, embalagem, expedição, recebimento e montagem das bielas permanecem sem alteração.

O ciclo de nitretação, em si, de componentes sinterizados é constituído de várias etapas. Considerando o reator já carregado as peças a serem nitretadas passam por 6 etapas, graficamente representadas na figura 5.2.

Figura 5.2- Visão operacional dos ciclos de nitretação a plasma.



Fonte: autoria própria

Etapa I: vácuo até pressões na ordem de 10^{-2} Torr;

Etapa II: aquecimento até a temperatura de 250 °C;

Etapa III: patamar de 30 minutos em 250 °C para a degasagem;

Etapa IV: aquecimento até a temperatura de tratamento desejada, com a simultânea limpeza e remoção do óleo de calibração das peças em descarga luminescente anormal de hidrogênio (H₂).

Etapa V: patamar de realização da nitretação;

Etapa VI: resfriamento em plasma de H₂ de pouca intensidade.

O estudo irá se concentrar principalmente na Etapa V, variando-se a temperatura de patamar, além da mistura gasosa através da relação dos percentuais da mistura gasosa N₂ + H₂.

O objetivo final é atingir uma especificação para a camada de nitretos (camada branca ou camada de compostos) com as seguintes características:

- **Fase de nitretos γ' (Fe₄N)**

- **Camada branca livre de defeitos com espessura homogênea e de no mínimo 6 μ m.**

As atividades necessárias a se desenvolver para atender os objetivos deste trabalho foram divididas em 3 (três) fases distintas, assim definidas:

- Fase Laboratorial: Na fase Laboratorial foram realizados estudos preliminares das condições de nitretação utilizando reator em escala laboratorial e poucas amostras. As amostras obtidas foram caracterizadas quanto à microestrutura e desempenho tribológico em tribômetro.

- Fase Desenvolvimento de Produto: Nesta fase aplicaram-se os resultados obtidos na fase Laboratorial utilizando um reator de maior capacidade (reator piloto), componentes reais e maior quantidade de amostras. Aspectos relacionados com o desenho do suporte de peças passam a ser considerados.

As amostras obtidas foram caracterizadas quanto à microestrutura e desempenho tribológico em tribômetro.

Algumas configurações de camada foram produzidas tendo em vista a montagem de compressores para testes de confiabilidade. O sucesso nestes testes é condição necessária para a execução da Fase de Desenvolvimento de Processo.

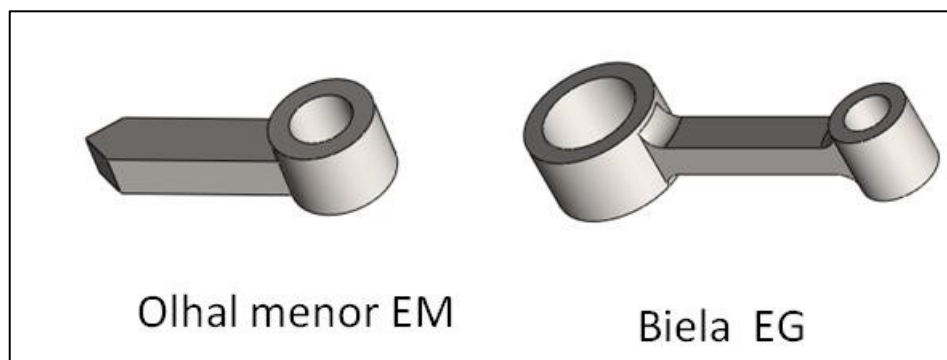
- Fase Desenvolvimento do Processo: Esta fase final consistiu em homologar o reator em escala industrial, utilizando um novo desenho de suporte cargas completas de peças. Condições operacionais, gradientes térmicos e variações na espessura de camada nitretada foram avaliados para validar a aplicação da solução em escala industrial.

6 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS

6.1 AMOSTRAS E COMPONENTES

Para o desenvolvimento deste trabalho não foram processados amostras (disco e cilindros vazados) confeccionados no laboratório por metalurgia do pó e sim componentes reais. Foram utilizados componentes industrializados obtidos junto a um dos fornecedores da Embraco. Foram tratados dois modelos de bielas: a) Biela inteiraça de compressor da família EG; b) Olhal menor de compressor da família EM. Os dois modelos são fabricados por metalurgia do pó em liga FeC, e foram fornecidos no estado calibrado, sem nitretação. Os dois componentes podem ser vistos na figura 6.1.

Figura 6.1 – Componentes a serem utilizados



Fonte: autoria própria

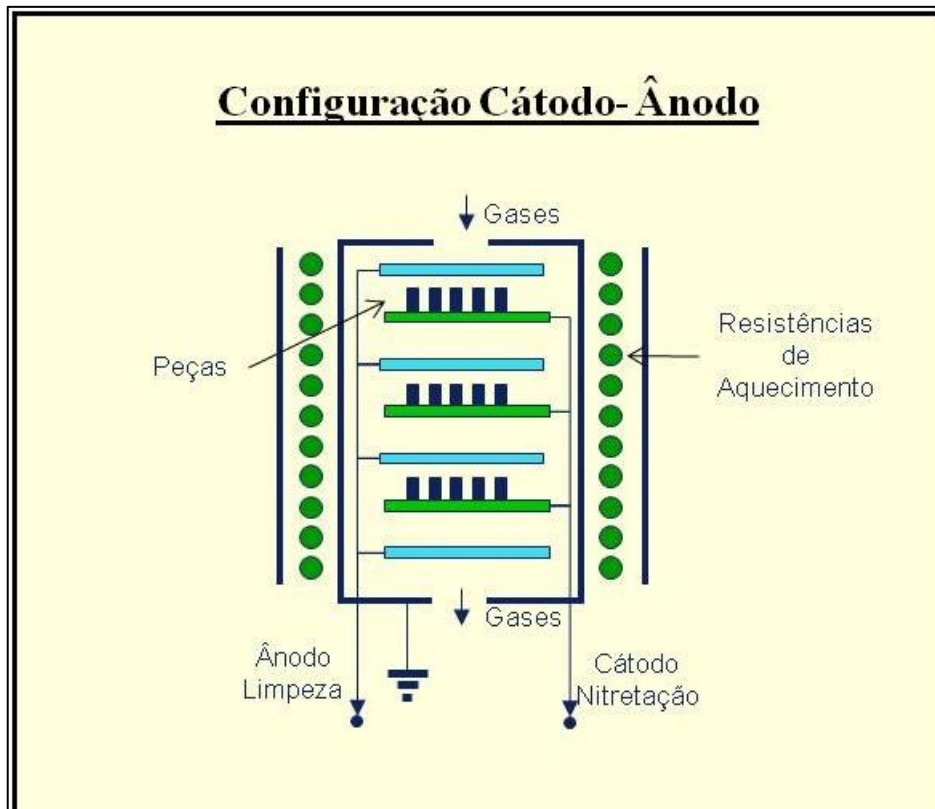
6.2 REATORES DE NITRETAÇÃO.

Para cada fase da tese foram utilizados diferentes tipos de reatores de nitretação, caracterizados principalmente pela sua capacidade de carga de peças:

- Reator Laboratorial
- Reator Piloto.
- Reator Industrial.

Todos os 3 reatores foram desenvolvidos pelas equipes do Labmat, e possuem configuração Cátodo-Ânodo (solução patenteada), que permite a extração do óleo de calibração sob plasma. A configuração esquemática destes equipamento pode ser vista na figura 6.2.

Figura 6.2 – Esquema construtivo dos reatores de nitretação



Fonte: autoria própria

6.3 METODOLOGIA DE CARACTERIZAÇÃO

As amostras e os componentes utilizados durante o desenvolvimento das diversas etapas do projeto foram caracterizados por diferentes sistemas de medição que permitiram efetuar a determinação dos valores das diversas grandezas necessárias para uma correta caracterização do produto, quanto às suas propriedades microestruturas, dimensionais, topográficas e tribológicas.

6.3.1 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

6.3.1.1 Preparação metalográfica.

A correta preparação metalográfica de camadas de superfícies e revestimentos é da máxima importância, pois se corre o risco de danificá-las durante o processo levando a erros de medição e interpretação visual. Portanto deve-se seguir o seguinte procedimento:

1. Seccionamento das amostras em cortadeira automática para realização do embutimento;
2. Recobrimento das amostras com folha de cobre para que a região de interesse não fosse obstruída pela baquelite durante o embutimento e para que a camada não fosse danificada durante o lixamento;
3. Embutimento das superfícies com resina de alta dureza (Isofast – Struers) para melhor visualização das bordas no microscópio;
4. Lixamento das amostras em 80, 240, 400, 600 e 1200 mesh, polimento em suspensão de alumina 1 μm
5. Ataque com nital 2% (98 ml de álcool PA e 2 ml ácido nítrico) por aproximadamente 6 segundos para destaque da camada nitretada.

6.3.1.2 Microscopia óptica

As amostras tratadas foram caracterizadas por microscopia óptica, utilizando microscópio Leica – DM 4000 M com câmera digital acoplada (Leica DC 300). As imagens foram obtidas em tonalidades de cinza com resolução de 2088 e 1555 pixels na vertical e horizontal, respectivamente.

6.3.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A caracterização da superfície e secção transversal das amostras foram efetuadas em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) modelo JEOL JSM-6390LV convencional com filamento de tungstênio, voltagem de aceleração: 0.5 a 30kV . A composição química das mesmas foi obtida utilizando-se microsonda de energia dispersiva de raios X (EDX) acoplada ao MEV. As imagens da superfície foram obtidas em diferentes aumentos utilizando-se o detector de elétrons secundários (SE). Foram também realizadas imagens com o detector de elétrons retroespalhados (BSE) no intuito de destacar a presença de elementos de baixo peso molecular.

6.3.1.4 Difractometria de raios-x

Para a caracterização das fases presentes foi utilizado difratômetro Philips X'Pert MPD com ânodo de cobre, radiação $K\alpha$ ($\lambda=1,5418 \text{ \AA}$). A configuração utilizada foi geometria Bragg-Bretano, potência de 40 kV e 30 mA. No caminho ótico foram utilizadas fendas Soller e Divergente de 1° e $\frac{1}{4}^\circ$, respectivamente, rotacionador de amostras (60 rpm), colimador, e

monocromador com monocristal plano de grafite. Os parâmetros de leitura utilizados foram tamanho do passo angular de $0,05^\circ$ e tempo de passo igual a 1 segundo. A análise de fases foi realizada com o auxílio do programa computacional Philips - PC Identify 2.1 e do banco de dados ICDD PDF-2 2001.

6.3.2 CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA

O processo foi realizado via interferometria óptica de luz branca, com o equipamento da marca Zygo, modelo NewView 7300. Para obtenção da representação 3D da rugosidade, foi utilizado o software MountainsMap® 7.1 com a seguinte sequência: I) preenchimento dos pontos não medidos com uma forma suave a partir das alturas dos pontos vizinhos, II) nivelamento, III) remoção da forma, IV) separação entre rugosidade e ondulação através de um filtro gaussiano de $80\mu\text{m}$. A partir daí, foram calculados os parâmetros de rugosidade S_q , S_{pk} e S_{sk} , que são rugosidade média quadrática, altura média dos picos pronunciados acima do núcleo da rugosidade e assimetria respectivamente. Utilizando a mesma sequência, foi determinado o valor de S_q das amostras.

6.3.3 CARACTERIZAÇÃO TRIBOLÓGICA

Para avaliação tribológica foram realizados testes do tipo deslizamento alternado (*reciprocating*) com geometria esfera sobre plano em tribômetro CETR modelo UMT-3MO, utilizando os seguintes parâmetros:

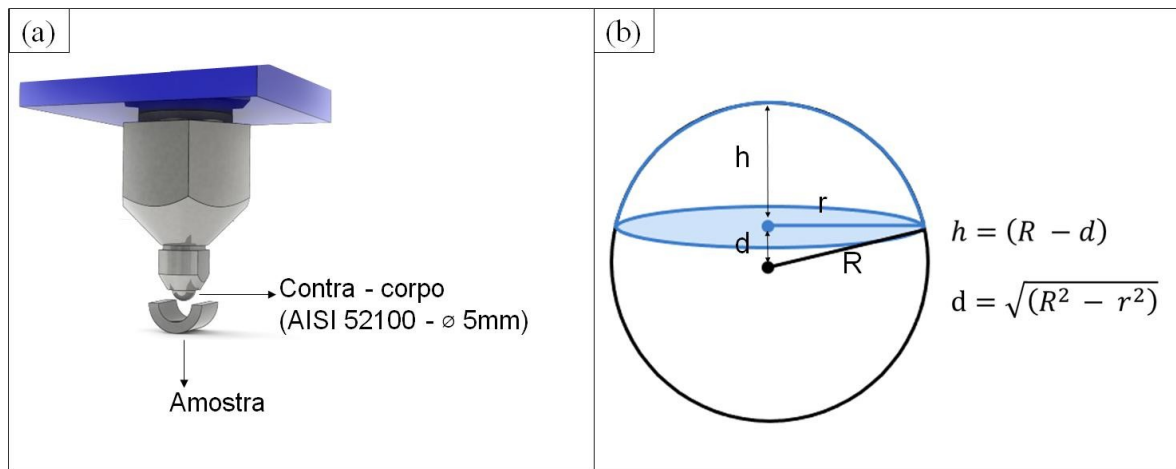
- Contra corpo: Esfera de aço para rolamento AISI 52100, diâmetro 5 mm;
- Carga: de 5,3 N.
- Frequência: 2 Hz;
- Amplitude: 6 mm;
- Tempo de ensaio: 2 h.
- Lubrificação: Sem;
- Temperatura e umidade: ambientes;

Após os testes o volume desgastado dos contra-corpos foi calculado pela equação do volume do segmento esférico, Equação (1). A figura 6.3 (a) mostra um esquema da

configuração do teste e a figura 6.3 (b) mostra o esquema do volume do segmento esférico usado para calcular o volume desgastado no contra-corpo, onde o parâmetro R foi medido por microscopia óptica.

$$V = \frac{\pi \cdot h}{6} (3R^2 + h^2) \quad (1)$$

Figura 6.3 - (a) Esquema dos testes de deslizamento alternado, (b) Esquema do volume do segmento esférico usado para calcular o volume desgastado do contra-corpo.



Fonte: autoria própria

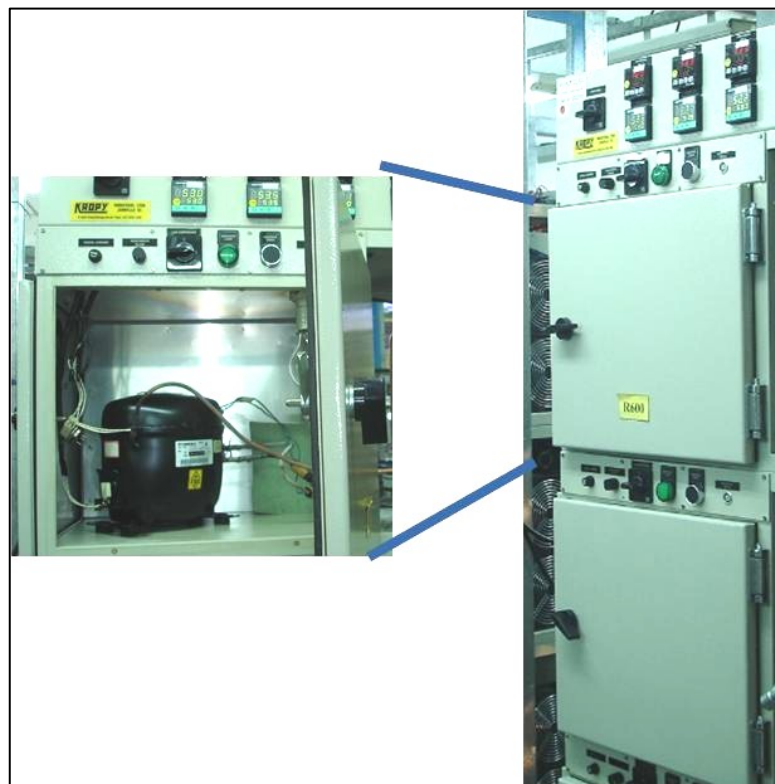
6.3.4 CARACTERIZAÇÃO DIMENSIONAL

Todos os ensaios foram realizados nos equipamentos e segundo as metodologias do Laboratório de Metrologia da Embraco.

6.3.5 TESTES DE CONFIABILIDADE TRIBOLÓGICA EM COMPRESSORES HERMÉTICOS.

Os testes de confiabilidade de compressores são realizados em painéis padronizados, bancadas específicas nas quais se procura reproduzir as condições de aplicação e nos quais é possível introduzir fatores de aceleração como carregamento mecânico e temperatura de funcionamento. Na figura 6.4 visualizam-se estas bancadas.

Figura 6.4 – Bancadas para testes de confiabilidade de compressores



Fonte: autoria própria

O teste de confiabilidade realizado é:

Testes de desgaste: o compressor deve atingir 500h (operação contínua) a alta pressão (+ 90°C de temperatura de condensação) sem falhas.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES: ESCALA LABORATÓRIAL.

7.1 ESTUDO DA FORMAÇÃO DA FASE Fe_4N (γ')

7.1.1 ETAPA PRELIMINAR: NITRETAÇÃO DE AMOSTRAS

Os testes preliminares foram realizados em amostras cilíndricas fabricadas de forma a se reproduzir a mesma microestrutura das bielas e olhais.

7.1.1.1 Fabricação das amostras.

O pó utilizado para preparação dos corpos de prova foi o Fe AHC 100.29 Höganäs, selecionado de acordo com o material das bielas e olhais, misturado com 0,8 wt% de *Acrax powder* por 45 minutos no misturador Y. Vinte corpos de prova foram compactados na prensa uniaxial automática com uma matriz de 20 mm de diâmetro, com dupla ação, sob uma pressão de 500 MPa, e a sinterização foi realizada em forno tubular de acordo com os parâmetros mostrados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Parâmetros utilizados na sinterização

Fluxo (cm ³ /min)	Mistura gasosa (%)	Temperatura (°C)	Tempo (h)
240	5H ₂ - 95Ar	1125	1

Fonte: autoria própria

Antes de serem submetidas à nitretação, as superfícies a serem tratadas foram lixadas (400, 600 e 1200 mesh) e polidas (suspensão de alumina 1 μ m) a fim de selar parte da porosidade da superfície e assim simular a operação complementar de calibragem realizada nas bielas.

7.1.1.2 Nitretação das amostras.

Neste primeiro momento, as variações de temperatura de tratamento e de misturas gasosas testadas são apresentadas na tabela 7.2. Tais parâmetros foram escolhidos com base nos estudos de (FONTES, 2014), (LAMIM, 2016) e (BINDER, 2006).

Tabela 7.2 - Denominação dos ciclos

Parâmetros/Ciclo	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5
Temp. do patamar (°C)	520	540	580	580	540
Concentração de N (%)	20	20	20	40	40

Fonte: autoria própria

Com exceção da temperatura de nitretação e da composição da atmosfera, todos os demais padrões foram mantidos constantes, e são mostrados na tabela 7.3.

Tabela 7.3 - Parâmetros de nitretação

Pressão (Torr)	T pulso off (ns)	Fluxo (sccm)	TAP (V)**	Corrente (A)	Tempo (h)	Frequência (kHz)
2	4096	240	479,0 ± 46,8	0,78 ± 0,06	2	50

**Altura do pulso.

Fonte: autoria própria

Em todos os ciclos, a temperatura de patamar foi mantida com um desvio de ± 4 °C. A montagem das amostras no suporte do reator de nitretação pode ser vista nas imagens da figura 7.1.

Figura 7.1 - Montagem das amostras no suporte do reator de nitretação



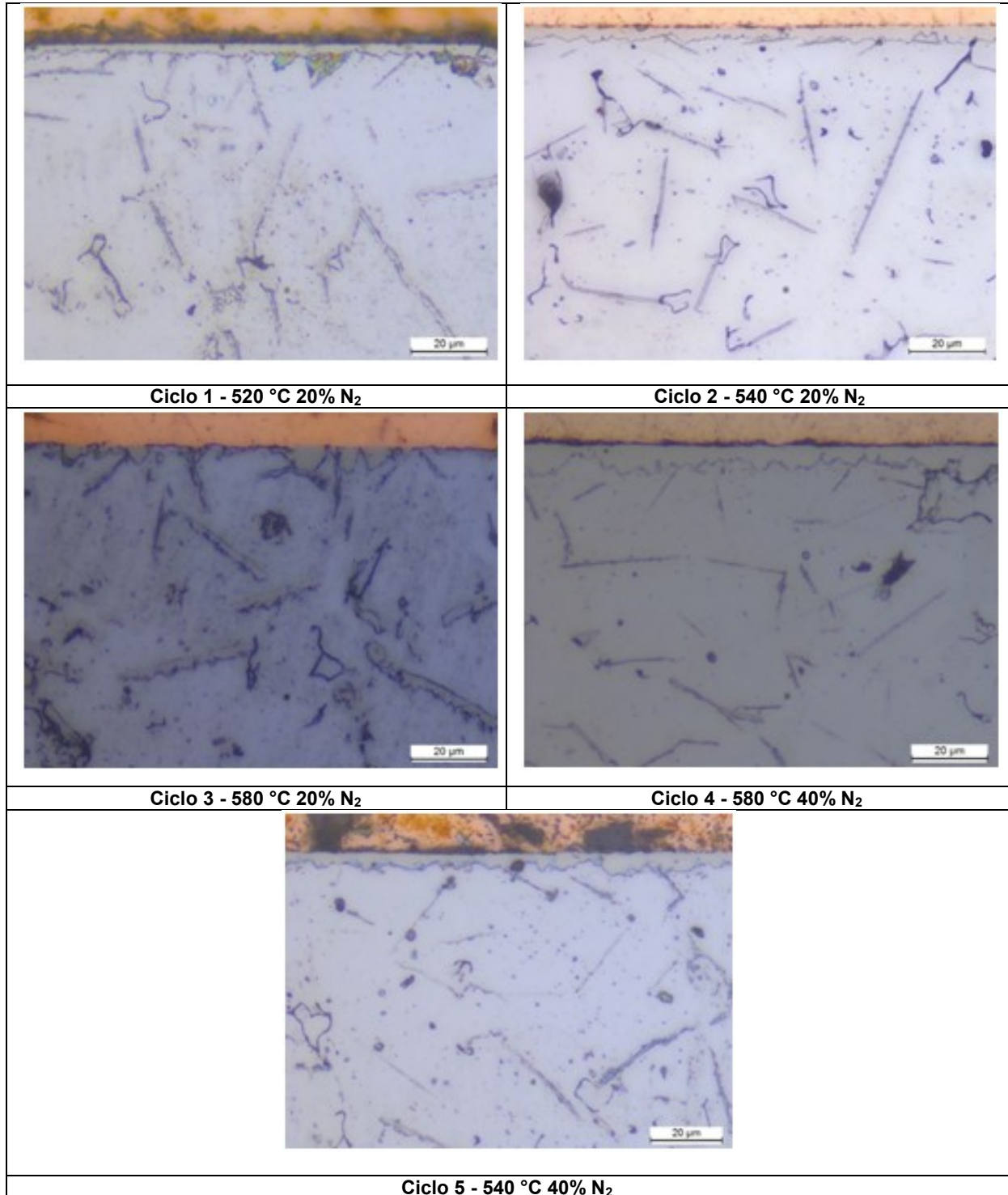
Fonte: autoria própria

7.1.1.3 Caracterização microestrutural das amostras.

Após a preparação metalográfica, utilizou-se o microscópio óptico Leica DM4000 M Led para obter as imagens das camadas e medir as espessuras das camadas nitretadas. Foram realizadas aproximadamente 20 medições por amostra, e posteriormente, calculadas a média

aritmética para obtenção de um valor para o tamanho das camadas, e os respectivos desvios padrão das mesmas. Uma imagem representativa da camada obtida em cada ciclo é apresentada da figura 7.2.

Figura 7.2 - Imagens representativas da camada obtida em cada ciclo.



Fonte: autoria própria

Realizadas as medições, foi possível chegar aos valores médios de espessura das camadas branca e seus respectivos desvios padrão, os quais são mostrados na Tabela 7.4.

Tabela 7.4 – Resultados das espessuras das camadas nitretadas

Ciclos	Condição de Tratamento	Camada Branca (μm)
1	520 °C – 20%N	2,80 \pm 0,40
2	540 °C – 20%N	4,09 \pm 0,91
3	580 °C – 20%N	5,35 \pm 1,12
4	580 °C – 40%N	5,92 \pm 1,31
5	540 °C – 40%N	4,35 \pm 0,91

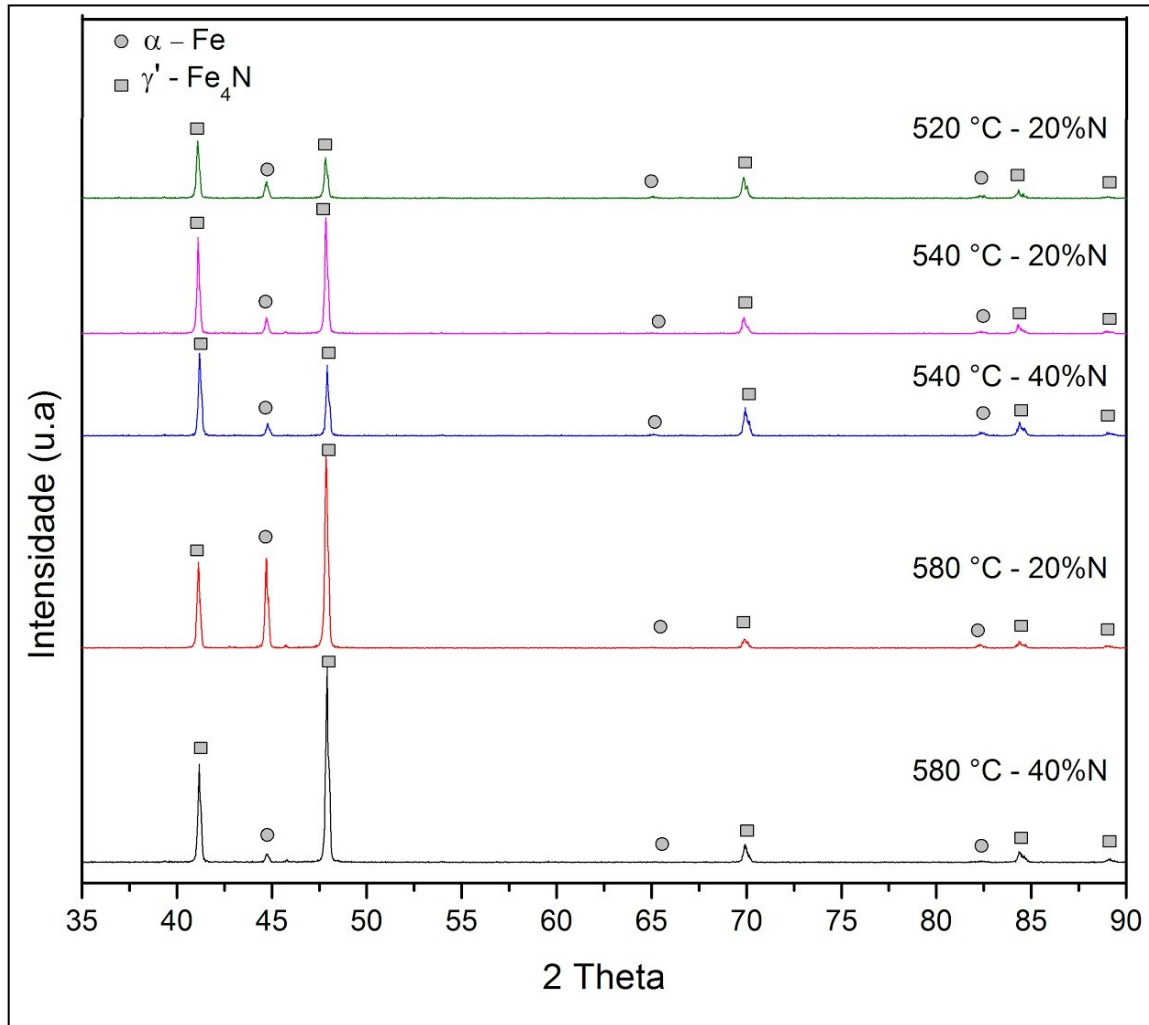
Fonte: autoria própria

De maneira geral, por meio das imagens obtidas no microscópio, pode-se notar que temperaturas de patamar mais elevadas, associadas aos maiores teores de nitrogênio da atmosfera nitretante, favoreceram a formação de maiores espessuras de camada branca, como previamente esperada.

7.1.1.4 Caracterização das fases de nitretos das amostras.

A Figura 7.3 apresenta os difratogramas de DRX de todos os ciclos realizados. É possível perceber que a estrutura γ' (Fe_4N) da camada branca foi favorecida em todas as condições de temperatura e percentual de nitrogênio estudado.

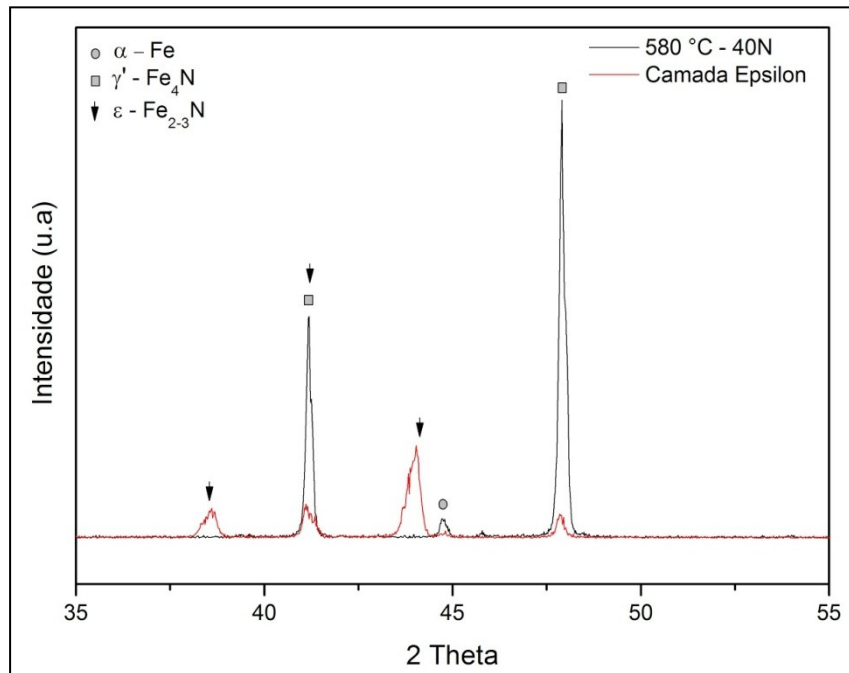
Figura 7.3 - Difratoformas de DRX das camadas em cada ciclo



Fonte: autoria própria

Caso houvesse a presença da fase ϵ , não desejada nas camadas brancas, haveria o aparecimento de dois picos bem característicos localizados na posição 2 Theta de aproximadamente 38,5 e 44, como ilustrado na figura 7.4.

Figura 7.4 - Difratomogramas de DRX mostrando as principais posições dos picos da fase Épsilon



Fonte: autoria própria

7.1.2 CONCLUSÕES.

Todas as condições de temperatura e percentual de Nitrogênio trabalhadas nos diferentes ciclos estabilizaram uma camada γ' monofásica.

Quanto à espessura de camada branca desejada ($\geq 6 \mu\text{m}$) somente o **Ciclo 4** (580 °C 40%N) atingiu o resultado com espessura de $5,91 \pm 1,31 \mu\text{m}$, que apesar de estatisticamente marginal, consideramos totalmente satisfatórios nesta etapa.

7.1.3 ETAPA PRELIMINAR: NITRETAÇÃO DE OLHAIS.

Na etapa anterior pré-validou-se as condições de nitretação que produzissem camadas nitretadas γ' com espessura mínima de $6 \mu\text{m}$ em amostras cilíndricas de ferro puro sinterizadas.

No entanto, antes da homologação das condições do processo, foi necessário avaliar se as condições pré-validadas também cumprem os requisitos para camadas nitretadas em bielas e olhais. Essa verificação se fez necessária devido a geometria desses componentes, uma vez que as condições de nitretação tendem a ser mais intensas dentro dos olhais (diâmetro interno), refletindo-se diretamente na camada formada nessa região.

Sendo assim, os testes descritos nesta etapa foram realizados nos olhais com as seguintes características: 12 mm de altura, 12 mm de diâmetro externo e 7,5 mm de diâmetro interno.

7.1.3.1 Nitretação dos Olhais.

Nesta etapa todas as condições para o processo de nitretação foram mantidas as mesmas, repetindo-se o Ciclo 4 e introduzindo-se um novo ciclo (Ciclo 6) com o percentual de nitrogênio um pouco menor que o ciclo 4, na expectativa de aumentar a espessura da camada. A redução do percentual de nitrogênio busca reduzir o gradiente químico de N_2 entre a superfície e o núcleo da peça, reduzindo a velocidade de difusão do nitrogênio aumentando a disponibilidade de N_2 para formação do composto de nitretos na superfície (camada branca). Vide tabela 7.5.

Tabela 7.5 Condições de nitretação estabelecidas para os olhais.

Parâmetros/Ciclo	Ciclo 4	Ciclo 6
Temp. do patamar (°C)	580	580
Concentração de N_2 (%)	40	30

Fonte: autoria própria

A montagem dos olhais no suporte do reator pode ser vista na imagem da figura 7.5.

Figura 7.5 - Montagem utilizada para nitretação dos olhais

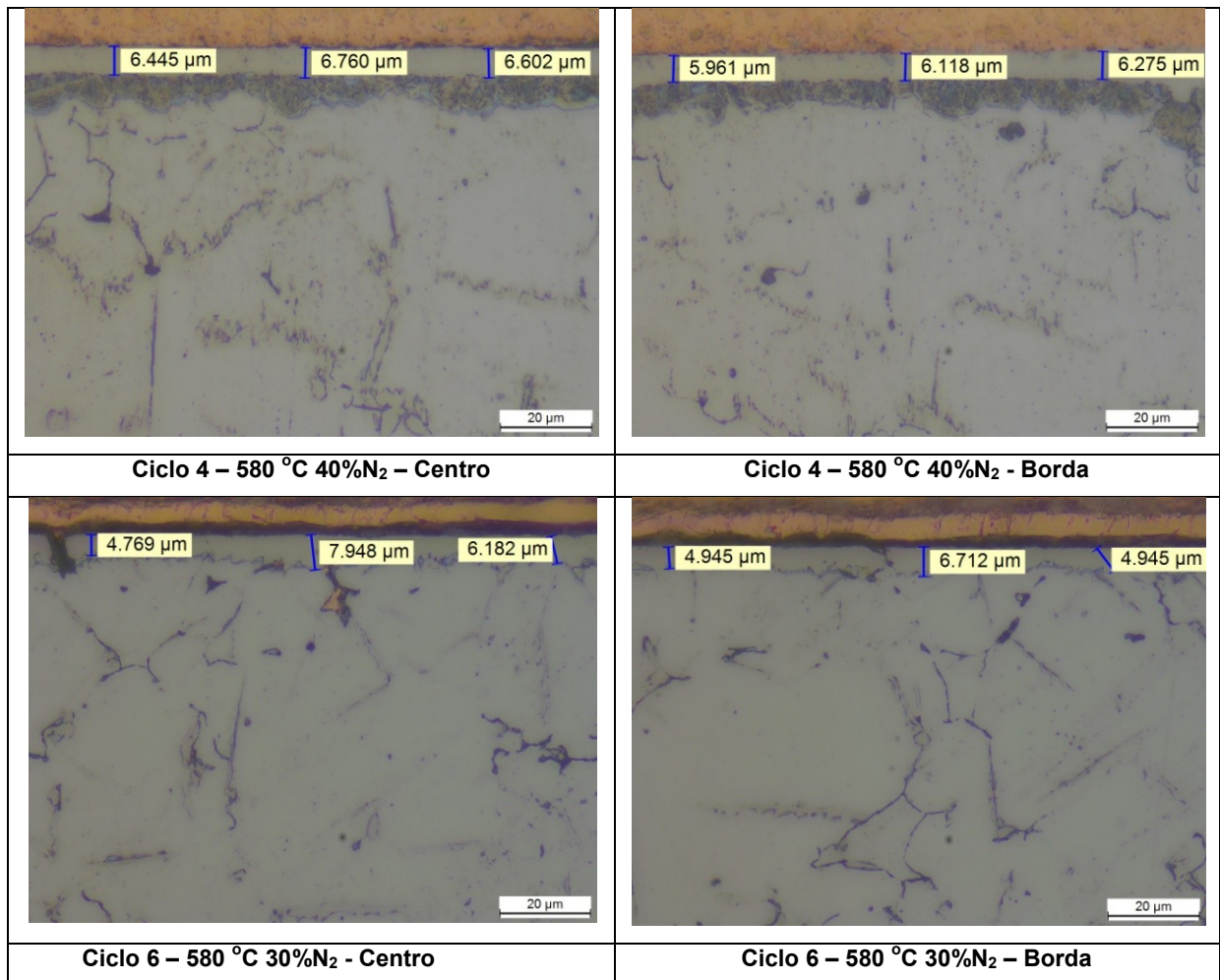


Fonte: autoria própria

7.1.3.2 Caracterização microestrutural das amostras.

Uma imagem representativa da camada obtida nos olhais em cada ciclo é apresentada da figura 7.6. Como esta se tratando um componente real, é importante garantir a homogeneidade da espessura da camada ao longo de toda a altura do olhal. Para avaliar a homogeneidade da camada foram realizadas medições de espessura no centro e na borda do olhal.

Figura 7.6 – Imagens representativas da camada obtida em cada ciclo.



Fonte: autoria própria

As medidas foram feitas no centro, e na borda do olhal, tabela 7.6, para verificar a homogeneidade. Após isso, foi calculada uma média aritmética para estes valores. A tabela 7.7 nos mostra os valores médios de espessura de camada obtidos.

Tabela 7.6 – Espessura das camadas considerando centro e borda.

Ciclos	Camada Branca no Centro (μm)	Camada Branca na borda (μm)
4	6,60 \pm 0,16	6,12 \pm 0,16
6	6,30 \pm 1,59	5,53 \pm 1,02

Fonte: autoria própria

Tabela 7.7 - Espessura média das camadas obtidas

Ciclos	Condição de Tratamento	Camada Branca (μm)
4	580 °C – 40%N	6,46 \pm 0,29
6	580 °C – 30%N	5,80 \pm 1,20

Fonte: autoria própria

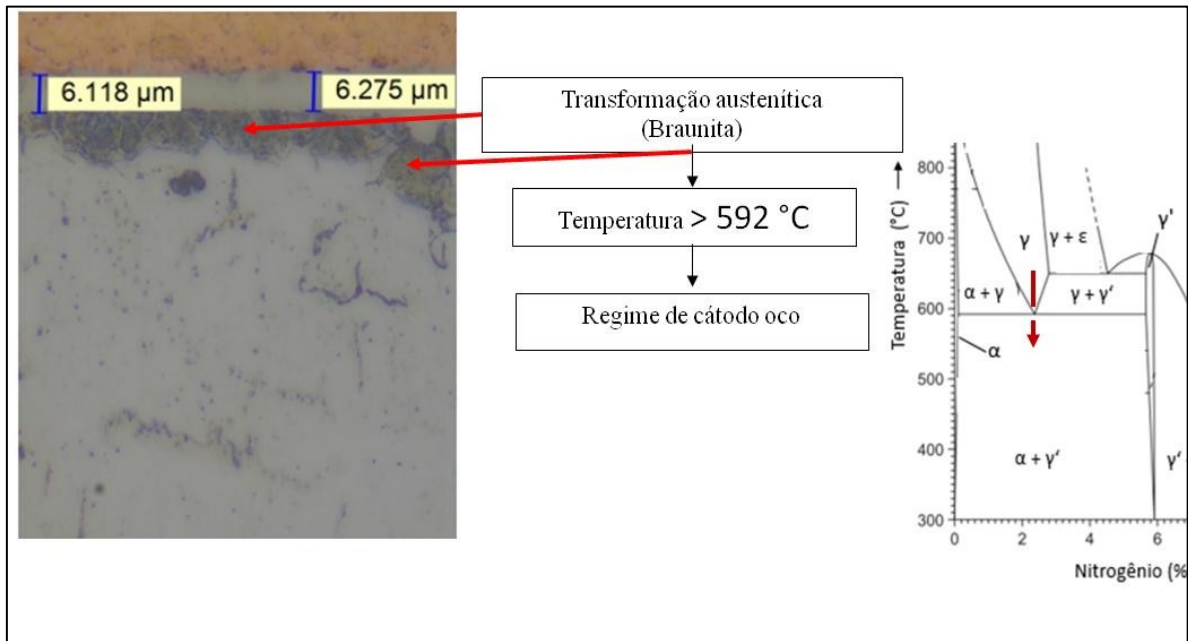
7.1.3.3 Conclusões parciais.

Quanto à espessura média de camada foi constatado que a aplicação no Ciclo 4 nos olhais conseguiu produzir uma camada com espessura superior a 6 μm , como desejado. Já o Ciclo 6 produziu uma camada média de 5,80 μm , não confirmando a tendência termodinâmica esperada de produzir uma camada maior que o Ciclo 4, pela redução do gradiente químico de N_2 com a mistura mais pobre em N_2 . Este fato é um indicativo de que a temperatura in situ na superfície da peça encontrava-se maior que a desejada.

Também se percebeu certo nível de heterogeneidade da espessura ao longo do comprimento do olhal (comparando Centro e Borda), aceitável no caso no Ciclo 4, mas não aceitável no caso do Ciclo 6.

Foi possível perceber uma diferença entre o tamanho da camada de compostos da borda e do centro do olhal. Analisando a microestrutura das camadas obtidas em mais detalhes, percebe-se uma subcamada escura abaixo da camada de compostos, principalmente no Ciclo 4. O aspecto visual desta subcamada é mais perceptível com maiores ampliações, como mostra a figura 7.7 abaixo.

Figura 7.7 – Camada subsuperficial - Braunita



Fonte: autoria própria

Essa camada escura, denominada Braunita, ocorre acima da temperatura eutetóide do sistema Fe-N (592 °C). Nesta temperatura, a nitretação ocorre no campo austenítico e há o surgimento de uma camada intermediária entre as camadas branca e de difusão, de aspecto escuro. Essa camada é resultante da decomposição eutetóide da austenita nas fases Fe- α e Fe₄N- γ durante o resfriamento após o término do tratamento.

Sendo assim, o surgimento dessa camada intermediária na nitretação dos olhal indica a ocorrência de superaquecimento no interior do olhal, que por tratar-se de um orifício deve ter desenvolvido uma descarga típica de cátodo oco (PIMENTEL, 2007). Na prática, significa que apesar da temperatura de patamar da nitretação estar controlada em 580 °C, no interior do olhal, em sua superfície interna, a temperatura encontrava-se superior aos 592 °C, devido ao confinamento do plasma. (cátodo oco).

A ocorrência de cátodo oco, também explica o resultado de baixa espessura de camada encontrado no Ciclo 6 (5,80 μm), pois a temperatura elevada intensificou a difusão do nitrogênio para o interior da peça, reduzindo a espessura da camada branca.

Conclui-se então que havia a necessidade de realização de novos ciclos com condições que minimizem a formação de cátodo oco e a formação da Braunita.

7.1.3.4 Nitretação dos Olhais para eliminação da Braunita.

Tendo como objetivo definir condições de nitretação, que além de garantirem a especificação desejada [fase γ' (Fe₄N); camada $\geq 6 \mu\text{m}$], evitem a formação da Braunita, foram realizadas mais 3 variações de ciclos, conforme tabela 7.8. Para tanto se reduziu as temperaturas de processamento para conseqüentemente reduzir a temperatura resultante no interior dos olhais, devido ao cátodo-oco e mantendo uma mistura mais pobre em N₂, para favorecer o crescimento da camada branca.

Tabela 7.8 – Ciclos para eliminação da Braunita

Parâmetros/Ciclo	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9
Temp. do patamar (°C)	570	560	540
Concentração de N ₂ (%)	30	30	30

Fonte: autoria própria

Novamente, todos os parâmetros foram mantidos constantes, inclusive a concentração de Nitrogênio fixada em 30%, variando somente as temperaturas de patamar.

Após a realização de cada ciclo procedeu-se a caracterização metalográfica, seguindo os procedimentos anteriores.

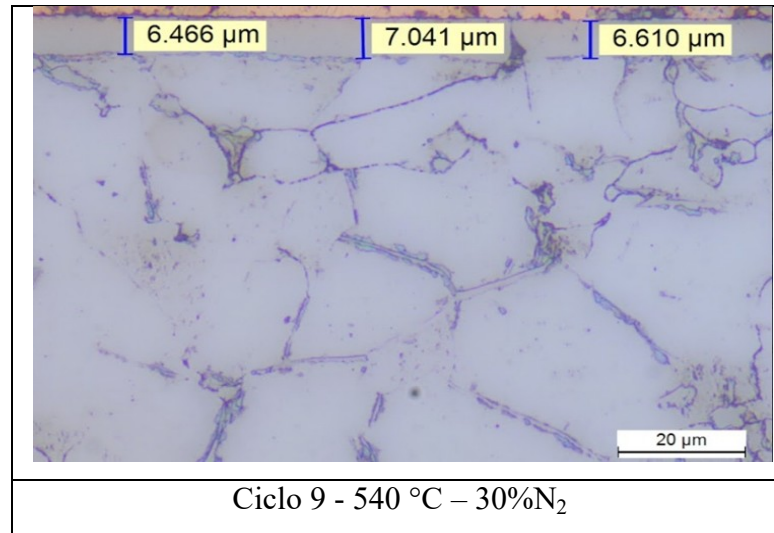
- Resultados.

Os Ciclos 7 e 8 com temperaturas de 570 °C e 560 °C, respectivamente, não foram capazes de eliminar a ocorrência da Braunita e os resultados detalhados não são apresentados por questões de simplificação.

O ciclo 9 (540 °C e 30% N₂) apresentou o resultado desejado, detalhado a seguir.

O aspecto visual da camada obtida no ciclo 9 pode ser vista na imagem da figura 7.8.

Figura 7.8 - Imagem representativas da camada obtida no Ciclo 9.



Fonte: autoria própria

As medidas foram feitas no centro, e na borda do olhal, tabela 7.9, para verificar a homogeneidade. Os resultados são satisfatórios.

Tabela 7.9 - Espessura das camadas considerando centro e borda

Ciclos	Camada Branca no Centro (μm)	Camada Branca na borda (μm)
9	$6,29 \pm 0,36$	$6,19 \pm 0,25$

Fonte: autoria própria

O Ciclo 9, foi repedido 3 vezes e o resultado médio geral de todas as medições de espessura de camada são mostrados na tabela 7.10.

Tabela 7.10 - Espessura média das camadas obtidas em 3 réplicas do Ciclo 9.

Ciclos	Condição de Tratamento	Camada Branca (μm)
9	$540 \text{ °C} - 30\%N_2$	$6,23 \pm 0,55$

Fonte: autoria própria

Completando a caracterização microestrutural, não se identificou a presença de Braunita em nenhuma das amostras analisadas.

7.1.4 CONCLUSÕES FINAIS

Após a realização desta etapa foi possível definir as condições preliminares de nitretação para os olhais do compressor, atendendo as especificações desejadas, com os resultados do Ciclo 9.

Especificação:

Camada branca monofásica γ' (Fe_4N), com espessura homogênea $\geq 6 \mu\text{m}$.

Parâmetros de nitretação que atenderam à especificação.

- Tensão de saída: 500 V
- Pressão: 266 Pa (2,0 Torr)
- Temperatura de Patamar: 540 °C
- Mistura Gasosa: (30% N_2 + 70% H_2)

7.2 O EFEITO DO CÁTODO OCO SOBRE O COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DAS CAMADAS NITRETADAS POR PLASMA.

Como visto nas etapas anteriores, componentes com cavidades como os olhais, podem ativar uma descarga altamente ionizada em seu interior, sob condições específicas de plasma, o que é conhecido como efeito cátodo oco (HCE) (R. GRÜN, 1991).

A densidade de corrente em uma descarga de cátodo oco pode ser de uma a três ordens de magnitude maior do que para uma descarga plana semelhante na mesma tensão (V.I. KOLOBOV, 1995), (R.S. PESSOA, 2018). Devido a este fato, um superaquecimento local da superfície pode ocorrer durante a nitretação e causar transformações estruturais e microestruturais inesperadas nas camadas de nitreto, como porosidade, crescimento colunar e surgimento de braunita.

Em reatores de escala industrial, há sempre a presença de gradientes de temperatura.

O controle da temperatura é importante para todos os tratamentos termoquímicos, uma vez que o tempo de processamento pode ser reduzido significativamente, mesmo aumentando a temperatura por uma pequena margem, reduzindo o custo geral dos tratamentos. Pode ocorrer a tendência de operar um equipamento nos limites superiores de temperatura de processo.

Eventualmente pode ocorrer um descontrole no controle de temperaturas, mesmo dentro dos limites operacionais.

Em resumo, um processo industrial de nitretação por plasma está sujeito a variações na temperatura de patamar ideal e quando as peças possuem orifícios como os olhais, a ocorrência de cátodo oco é uma possibilidade, prejudicando a qualidade tribológica da camada branca pela presença de defeitos, como porosidade, crescimento colunar e surgimento de braunita.

Estes desvios microestruturais, normalmente, são identificados após a conclusão do tratamento de nitretação na inspeção do controle qualidade. A questão passa por uma tomada de decisão gerencial sobre o descarte ou assumir um risco de qualidade em usar as peças com estes desvios. Assumir um risco de qualidade só é possível com o real conhecimento da perda de resistência ao desgaste de uma camada nitretada com os defeitos citados.

Portanto, o objetivo desta etapa foi avaliar a influência das características topográficas e microestruturais induzidas pela presença do efeito de cátodo oco nas propriedades tribológicas de camadas de compostos de nitreto em ferro sinterizado. (THIAGO DE SOUZA LAMIM, 2019)

7.2.1 OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS.

Os substratos utilizados neste trabalho foram cilindros ocos de ferro puro sinterizado com diâmetro interno de 7,5 mm e altura de 9,0 mm.

A Tabela 7.11 mostra os parâmetros usados nos tratamentos de nitretação a plasma.

As temperaturas e misturas de gases foram escolhidas a fim de avaliar as regiões de transição no diagrama de fases induzindo a formação, pelo efeito de cátodo oco, de dois típicos defeitos:

- Nitretação Colunar: crescimento colunar para a fase ϵ
- Nitretação com Braunita: formação de braunita para a γ'

Além disso, produziu-se uma nitretação livre de defeitos para estabelecer a base para comparação (Ciclo 9, aprovado na etapa anterior):

- Nitretação Livre de Defeitos: camada de composto γ' sem defeitos microestruturais.

Tabela 7.11 - Parâmetros de nitretação de plasma

Nitretação	Temperatura (°C)	Mistura Gasosa	Tempo de Patamar (h)
Colunar	550	90% N ₂ + 10% H ₂ + 1% CH ₄	2
Braunita	570	30% N ₂ + 70% H ₂	2
Livre de defeitos	540	30% N ₂ + 70% H ₂	2

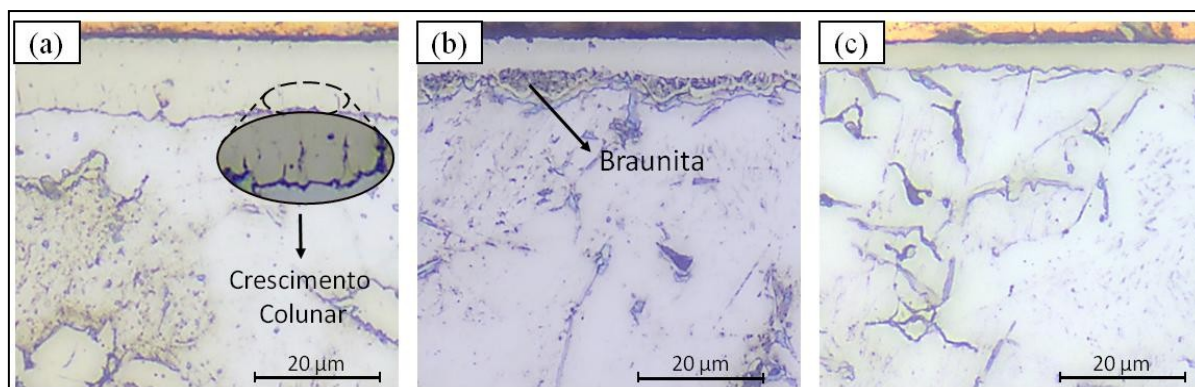
Fonte: autoria própria

As camadas nitretadas obtidas foram caracterizadas quanto à microestrutura, fases de nitretos (DRX), topografia e desempenho tribológico em tribômetro.

7.2.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

As micrografias ópticas de seção transversal das três condições de nitretação apresentadas na Figura 7.9. O ciclo para Nitretação Colunar promoveu a formação de uma camada composta com crescimento colunar, como mostrado em detalhes em fig. 7.9 (a). O ciclo para Nitretação Braunita desenvolveu uma camada escura sob a camada de composto de nitreto, fig. 7.9 (b), e o ciclo para nitretação Livre de Defeitos promoveu a formação de uma camada homogênea e sem defeitos, fig. 7.9 (c).

Figura 7.9- Microestrutura das camadas nitretadas de (a) Nitretação Colunar, (b) Nitretação Braunita, (c) Nitretação Livre de Defeitos



Fonte: autoria própria

A Tabela 7.12 mostra a espessura da camada composta. A camada mais espessa foi observada para a nitretação colunar, o que é atribuído à temperatura e ao alto potencial de nitrogênio na atmosfera deste tratamento (K.S. FANCEY, 1995), (A.F.O. SKONIESKI, 2008).

Tabela 7.12 – Espessura das Camadas obtidas nos três ciclos de nitretação

Nitretação	Espessura da camada branca (μm)
Colunar	$10,37 \pm 1,87$
Braunita	$5,53 \pm 0,60$
Livre de defeitos	$5,19 \pm 0,61$

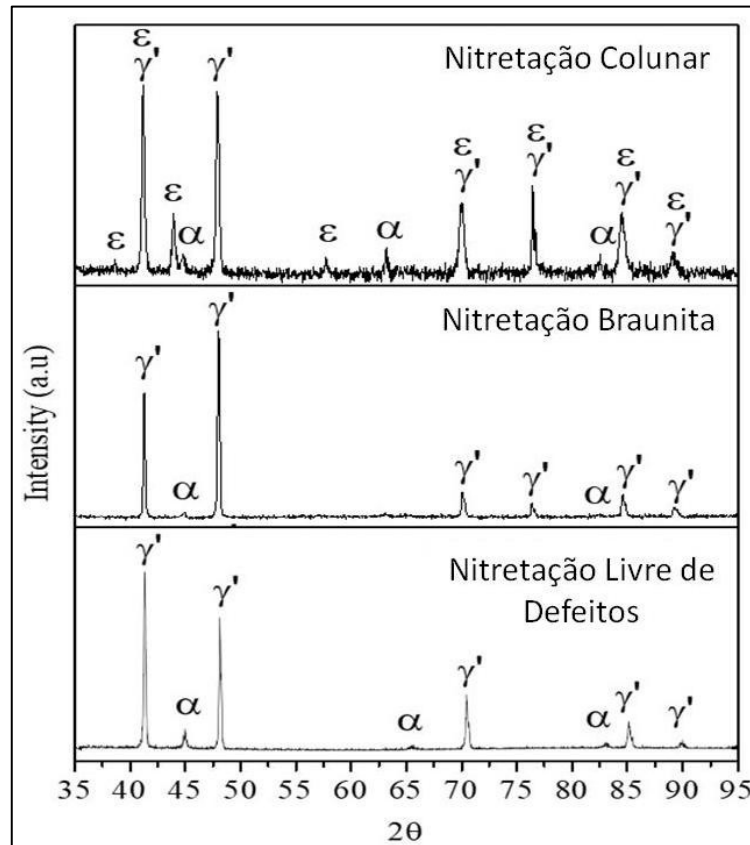
Fonte: autoria própria

7.2.3 CARACTERIZAÇÃO DAS FASES DE NITRETOS.

Os padrões de DRX dos espécimes de nitreto são apresentados na figura 7.10, onde os resultados mostram a influência da atmosfera de nitretação nas estruturas da camada de nitreto.

A nitretação Colunar desenvolveu uma camada multifásica composta por nitretos de ferro ϵ e γ' . A estabilização da fase ϵ está relacionada ao alto teor de nitrogênio e à pequena quantidade de metano (o Carbono estabiliza a formação da fase ϵ) na mistura de gases deste tratamento (T. LAMPE, 1993). Além disso, a morfologia da camada de composto multifásico vem da dificuldade em alcançar uma camada ϵ -monofásica, uma vez que ela pode se decompor em γ' de acordo com a reação $\epsilon \rightarrow \gamma' + \alpha\text{-Fe}$ (C. ALVES, 2007), (WÖHRLE, 2012). Por outro lado, os tratamentos de nitretação Braunita e Livre-de-defeitos desenvolveram uma camada de nitreto composta exclusivamente por ferro-nitreto γ' , como esperado devido ao potencial reduzido de nitrogênio na atmosfera desses tratamentos.

Figura 7.10 – Difração de RAIO-X das camadas obtidas.

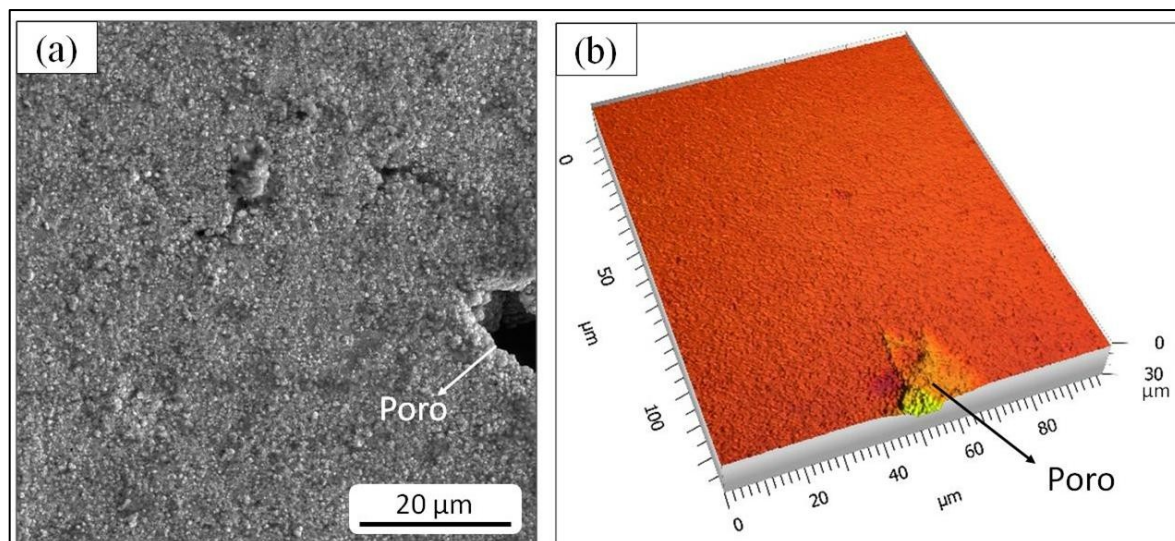


Fonte: autoria própria

7.2.4 CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA

A topografia da superfície da amostra de nitretação Braunita é apresentada na figura 7.11, ela representa um resultado típico de camadas nitretadas. O aspecto rugoso observado na imagem de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) (Fig. 7.11(a)) e na projeção axonométrica (Fig. 7.11 (b)), é atribuído ao mecanismo de formação de camadas na nitretação por plasma. Conforme relatado por Mason (R.S. MASON, 1994), a maioria dos átomos pulverizados retornam ao cátodo, desenvolvendo esta rugosidade típica nas superfícies das peças. Os poros identificados nas duas imagens estão relacionados à rota da metalurgia do pó utilizada para a obtenção dos corpos-de-prova.

Figura 7.11 - Nitretação Braunita: (a) topografia de superfície SEM, (b) projeção axonométrica da superfície.



Fonte: autoria própria

Características de superfície semelhantes foram identificadas nas amostras dos ciclos de Nitretação Colunar e Nitretação sem Defeitos.

Os resultados da análise topográfica quantitativa, representados pelo parâmetro S_q (Rugosidade média quadrática), evidenciam a similaridade entre os 3 ciclos (Tabela 7.13). As rugosidades superficiais dos corpos de provas, Colunar, Braunita e Livre de Defeitos, não apresentaram diferenças estatisticamente significativas. Assim, a natureza da fase de nitreto de ferro prevalente não afetou a topografia de superfície do ferro sinterizado tratado com plasma, como relatado anteriormente por (C. BINDER, 2015).

Tabela 7.13 - Parâmetro topográfico S_q (rugosidade média quadrática) dos espécimes avaliados

Nitretação	Parâmetro S_q (μm)
Colunar	$0,16 \pm 0,05$
Braunita	$0,18 \pm 0,03$
Livre de defeitos	$0,15 \pm 0,03$

Fonte: autoria própria

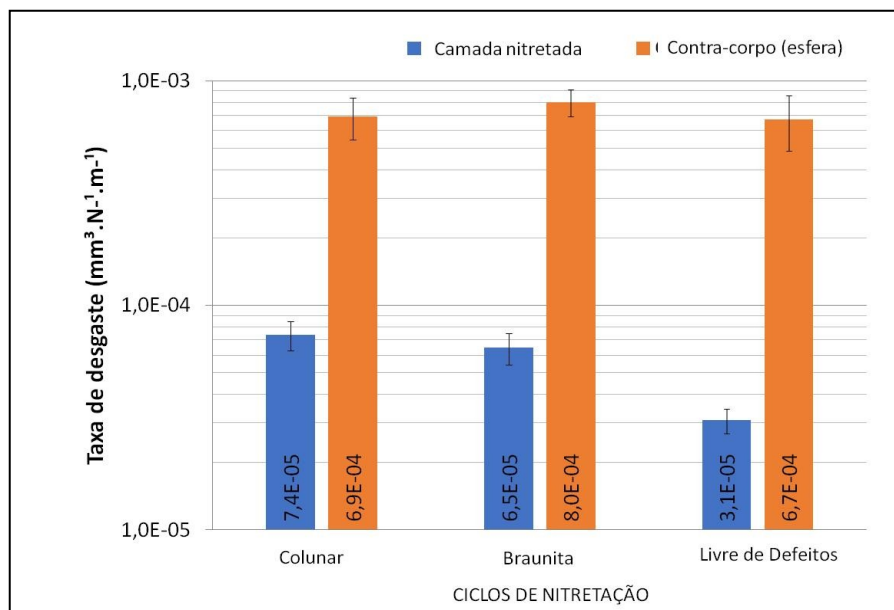
7.2.5 CARACTERIZAÇÃO TRIBOLÓGICA

Os testes tribológicos em tribômetro foram realizados conforme descrito no capítulo 5, tendo sido realizadas 3 réplicas para cada ciclo de nitretação.

Na figura 7.12, a taxa de desgaste das amostras e seus respectivos contra-corpos são exibidos. É possível observar que a resistência ao desgaste dos corpos de prova é diretamente afetada pela presença de crescimento colunar ou braunita abaixo da camada de composto compacto. Essas transformações microestruturais induzidas pela geometria sensível ao cátodo oco das peças causam um aumento significativo na perda de volume de desgaste das camadas de compostos de nitreto (figura 7.13).

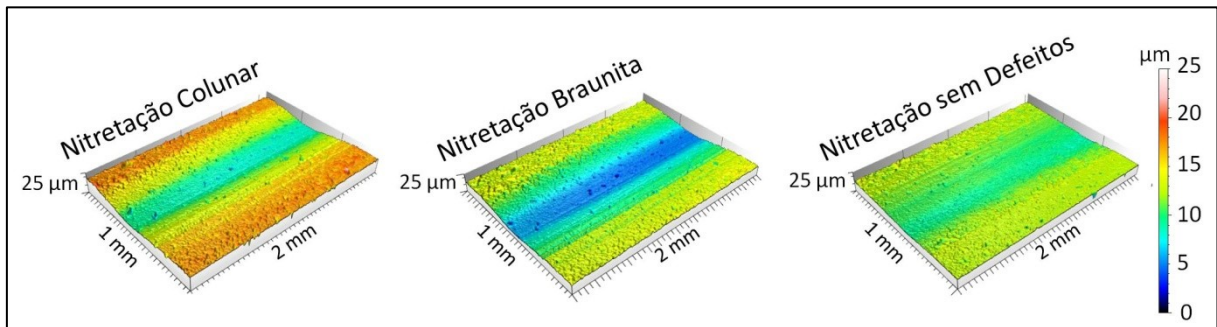
Assim, em comparação com a nitretação livre de defeitos, a nitretação colunar e a de braunita apresentaram uma taxa de desgaste 2,4 e 2,1 vezes maior, respectivamente. Além disso, as taxas de desgaste dos contra-corpos são uma ordem de magnitudes mais altas e permaneceram semelhantes para todas as condições de nitretação.

Figura 7.12 – Taxa de desgaste nas camadas nitretadas e seus contra-corpos



Fonte: autoria própria

Figura 7.13 - Marcas de desgaste das camadas após os testes de deslizamento alternativo obtidos por interferometria de luz branca.



Fonte: autoria própria

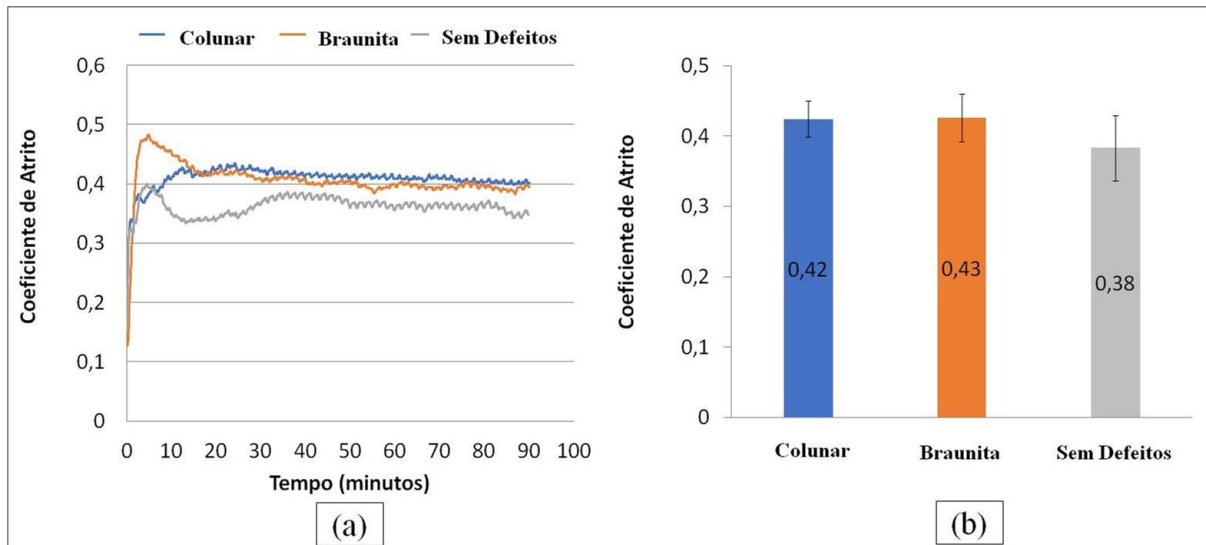
Binder C. et al. (C. BINDER, 2015) verificaram que as camadas de nitreto ϵ tendem a apresentar um desempenho superior em testes de desgaste por deslizamento quando comparadas às camadas γ' . No entanto, os resultados da Fig. 7.12 mostram que uma camada composta ϵ/γ' com crescimento colunar (nitretação colunar) apresenta uma taxa de desgaste mais alta do que uma camada livre de defeitos γ' . Assim, as características microestruturais, como o crescimento colunar, são prejudiciais ao desempenho tribológico de deslizamento das camadas ϵ .

A Figura 7.14 (a) apresenta o comportamento do coeficiente de atrito durante os testes tribológicos. Durante o transiente inicial, o coeficiente de atrito começa em torno de 0,12, aumentando rapidamente para valores acima de 0,40 para as condições de nitretação colunar e braunita. Por outro lado, o coeficiente de atrito da nitretação livre de defeitos permanece abaixo de 0,40 no transiente. Após 35 minutos, o regime de estado estacionário é alcançado para todas as condições e a figura 7.14 (b) mostra a média para cada tratamento de nitretação.

Embora exista uma ligeira diferença entre o coeficiente de atrito médio durante o regime de estado estacionário, a diferença entre os 3 ciclos não é estatisticamente significativa (ANOVA), permanecendo em torno de 0,40.

Portanto, o crescimento colunar ou braunita por baixo da camada de nitreto não afetou significativamente o coeficiente de atrito.

Figura 7.14 - (a) Variação do coeficiente de atrito ao longo do teste, (b) coeficiente de atrito médio durante o regime de estado estacionário.



Fonte: autoria própria

A análise dos mecanismos de desgaste foi realizada por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A figura 7.15 apresenta a seção transversal e a vista superior das marcas de desgaste para todos os tratamentos de nitretação.

- Nitretação Colunar:

Na região de contato da nitretação Colunar, figura 7.15 (a), observou-se que quando o desgaste atinge a estrutura colunar, as regiões intercolunares atuam como fissuras na camada composta. Conseqüentemente, esta característica induz a um fenômeno de desprendimento da camada de nitreto na forma de pequenas partículas, conforme visto na vista superior da marca de desgaste (destacada), figura 7.15 (b).

- Nitretação Braunita:

No caso da nitretação de Braunita, muitas trincas cruzando a camada de nitreto são observadas na região de contato, figura 7.15 (c). Embora onde esses defeitos sejam nucleados não seja evidente, a estrutura lamelar e a fragilidade da braunita indicam que as trincas surgem da camada de braunita. Na vista superior da marca de desgaste, observou-se que as fissuras estão interligadas, resultando na remoção de flocos, principalmente ao redor da porosidade, figura 7.15 (d).

De acordo com o modelo de mecanismo de desgaste para ferro sinterizado com nitretação por plasma, proposto por Binder C. et al. (C. BINDER, 2015), o processo de

desgaste induz o surgimento de microfissuras e a propagação das mesmas na interface entre a camada composta e a zona de difusão. A morfologia do crescimento colunar e a natureza frágil da fase braunita podem acelerar o aparecimento e propagação de fissuras dentro da camada composta e o processo de fratura dela. A relação entre um fenômeno de aceleração de trinca e a presença da fase braunita foi previamente evidenciada em um estudo de análise de crescimento por fadiga do aço de nitreto de plasma AISI 4140 (H. KOVACI, 2016).

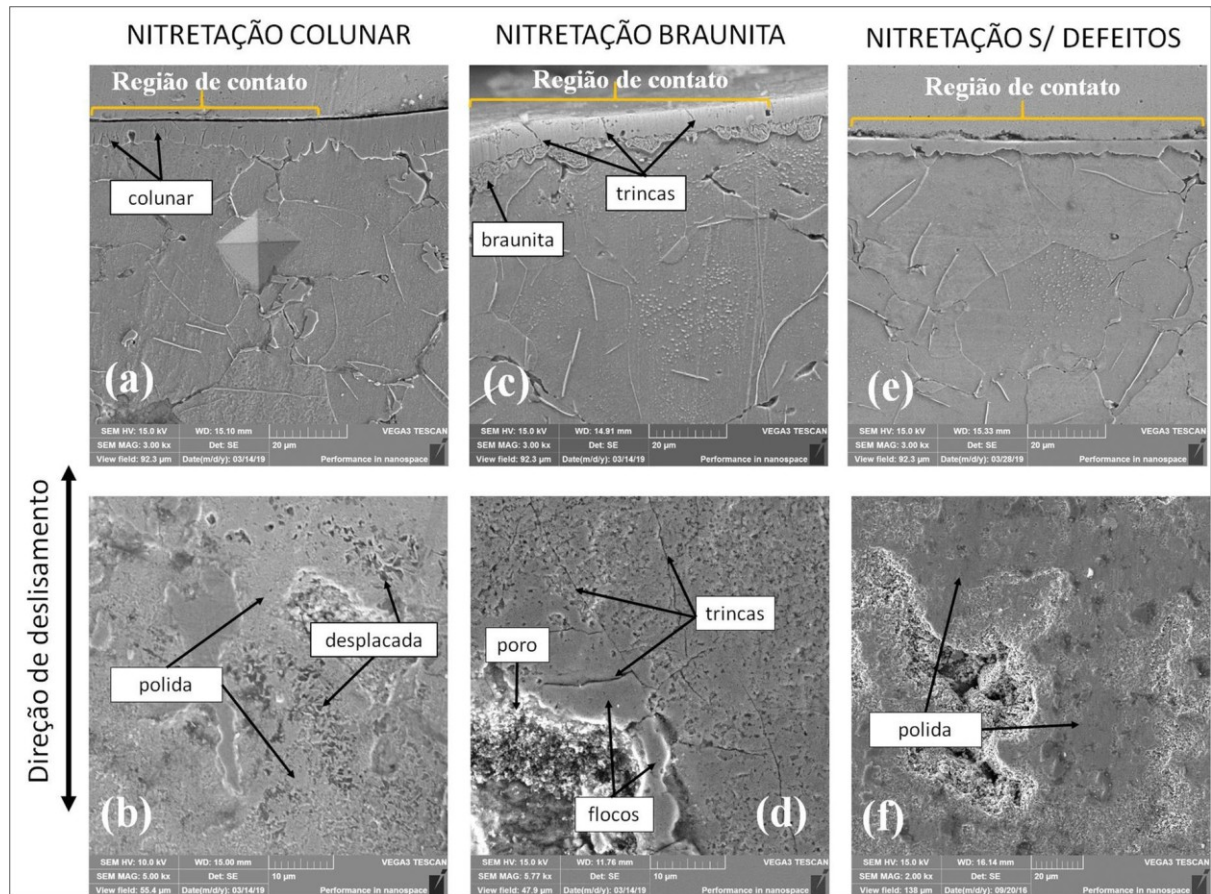
- Nitretação Livre de Defeitos:

A única alteração observada na região de contato da nitretação livre de defeitos foi na espessura da camada composta, que fica mais fina devido ao processo de desgaste, figura 7.15 (e). Além disso, a vista superior da marca de desgaste é caracterizada por áreas polidas, conforme indicado na figura 7.15 (f).

Portanto, as maiores taxas de desgaste apresentadas na figura 7.12, estão associadas ao mecanismo de desgaste frágil na nitretação colunar e na nitretação de braunita, enquanto a maior resistência ao desgaste da nitretação livre de defeitos está relacionada a um mecanismo de desgaste menos severo.

Figura 7.15 - Imagens MEV das marcas de desgaste:

- (a) Vista de seção transversal da nitretação colunar; (b) Vista superior da nitretação colunar; (c) Vista de seção transversal da nitretação de braunita; (d) Vista superior da nitretação de braunita; (e) Vista em corte transversal da nitretação sem defeitos; (f) Vista superior da nitretação sem defeitos.



Fonte: autoria própria

7.2.6 CONCLUSÕES SOBRE O EFEITO DO CÁTODO OCO

As condições de nitretação Colunar e Braunita apresentaram constituintes microestruturais típicos de temperaturas superiores às medidas pelo termopar. Isso indica que o efeito do cátodo oco pode causar esses fenômenos.

Com base nos resultados obtidos, as principais conclusões estão listadas a seguir:

- a taxa de desgaste é significativamente aumentada pela presença de braunita (2,1x) e crescimento colunar (2,4x) em comparação com a camada sem defeitos;
- a estrutura colunar atua como concentradora de tensão em uma região crítica, abaixo do contato tribológico, acelerando a nucleação e propagação de trincas que se

interligam e levam ao desprendimento da camada de nitreto em forma de pequenas partículas durante o contato deslizante;

- a natureza dura e quebradiça das camadas de braunita induz a nucleação e propagação de trincas nas camadas de nitreto durante o contato deslizante. A propagação desses defeitos acaba ocasionando a remoção de flocos, principalmente ao redor da porosidade, resultando em menor resistência ao desgaste;
- o coeficiente de atrito não foi influenciado pela presença dessas características microestruturais, uma vez que a diferença não foi estatisticamente significativa com todas as médias permanecendo em torno 0,4;
- a camada Livre-de-Defeitos, que representa a nova especificação (γ'), apresentou uma resistência ao desgaste 210% a 240% maior, e o mecanismo de desgaste no contato é de polimento suave.

8 RESULTADOS E DISCUSSÕES: FASE DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO.

Nesta fase foram aplicados os aprendizados obtidos na fase Laboratorial utilizando um reator de maior capacidade (reator piloto), componentes reais e maior quantidade de amostras por carga no reator. Nesta fase, aspectos relacionados com o projeto do suporte das peças também passaram a ser considerados.

Algumas configurações de camadas foram produzidas tendo em vista a montagem de compressores para testes de confiabilidade.

Na figura 8.1 é apresentada a sequência das etapas de processamento e caracterização que serão desenvolvidas nesta fase.

Figura 8.1 - Sequência das etapas de processamento e caracterização para a Fase de Desenvolvimento de Produto.



Fonte: autoria própria

8.1 NITRETAÇÃO DAS BIELAS NO REATOR PILOTO.

Bielas foram nitretadas nas duas condições descritas na tabela 8.1. A condição Fase γ' , representa a condição otimizada anteriormente e a Fase γ' – Oxinitretada é uma variação que consiste em produzir uma camada de oxinitretos sobre a camada branca γ' . A oxinitretação é obtida introduzindo-se o ar atmosférico na câmara do reator durante o resfriamento.

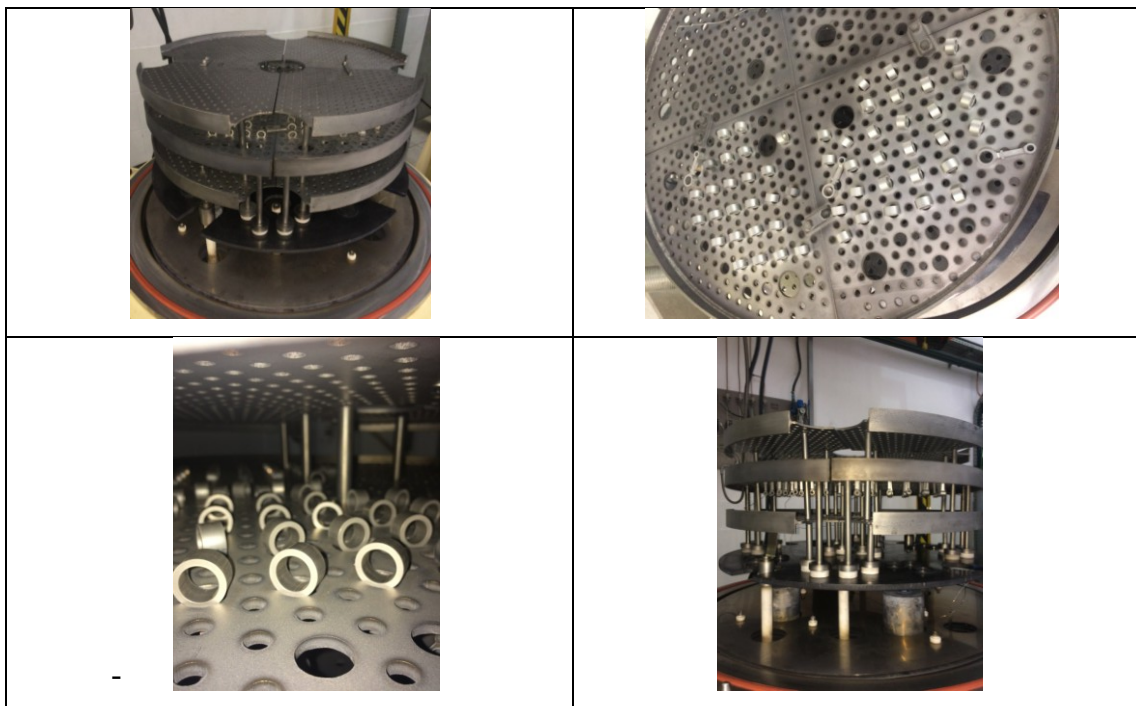
Tabela 8.1 - Condições de nitretação

Condição da Nitretação	Temperatura (°C)	Mistura Gasosa	Tempo de Patamar (h)
Fase γ'	540	30% N ₂ + 70% H ₂	2
Fase γ' - Oxinitretada	540	30% N ₂ + 70% H ₂ + (O ₂)	2

Fonte: autoria própria

Cada ciclo foi realizado com 50 peças e a configuração da montagem no suporte de nitretação do reator piloto pode ser vista nas imagens da figura 8.2.

Figura 8.2 - Montagem das bielas no suporte do reator piloto.

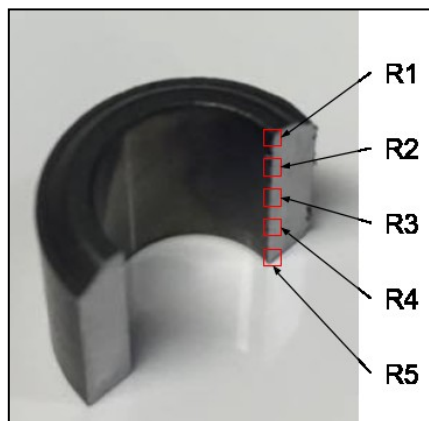


Fonte: autoria própria

8.1.1 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL.

As medições da espessura de camada foram realizadas ao longo da altura do olhal em 5 regiões conforme ilustrado na figura 8.3.

Figura 8.3 – Regiões de medição das camadas.



Fonte: autoria própria

Foram realizadas 5 medições em cada região da peça, em 3 amostras de diferentes posições da carga. Os resultados das médias e desvios padrões são apresentados a seguir.

Os valores obtidos para a espessura da camada na condição Fase γ' , apresentados na tabela 8.2, permitem confirmar a homogeneidade da espessura ao longo do comprimento o olhal (regiões 1 a 5) e um valor médio total de $6,57 \mu\text{m}$, que atende à especificação de espessura camada branca $\geq 6,00 \mu\text{m}$.

Tabela 8.2 – Espessura de camada Condição Fase γ'

Espessura da camada branca (μm)					
Região (R)	1	2	3	4	5
Média	6,56	6,56	6,68	6,88	6,72
DevPad	0,58	0,34	0,69	0,97	0,40
Média Geral	6,57				
Despad Geral	0,65				

Fonte: autoria própria

Os valores obtidos para a espessura da camada na condição Fase γ' - Oxinitretada, apresentados na tabela 8.3 (camada branca), permitem confirmar a homogeneidade da espessura ao longo do comprimento o olhal (regiões 1 a 5) e um valor médio de $7,57 \mu\text{m}$ para

a camada branca (que atende à especificação de espessura camada branca $\geq 6,00 \mu\text{m}$). Na tabela 8.4 também se percebe a homogeneidade da camada de oxinitretos ao longo do olhal (regiões 1, 3 e 5) e um valor médio de $1,29 \mu\text{m}$ cujo valor desejado é de $\geq 1,00 \mu\text{m}$.

Tabela 8.3 - Espessura de camada branca Condição Fase γ' -Oxinitretada

Espessura da camada branca (μm)					
Região (R)	1	2	3	4	5
Média	7,59	7,40	8,01	7,56	7,58
DevPad	0,76	0,33	0,46	0,55	0,38
Média Geral	7,57				
Despad Geral	0,54				

Fonte: autoria própria

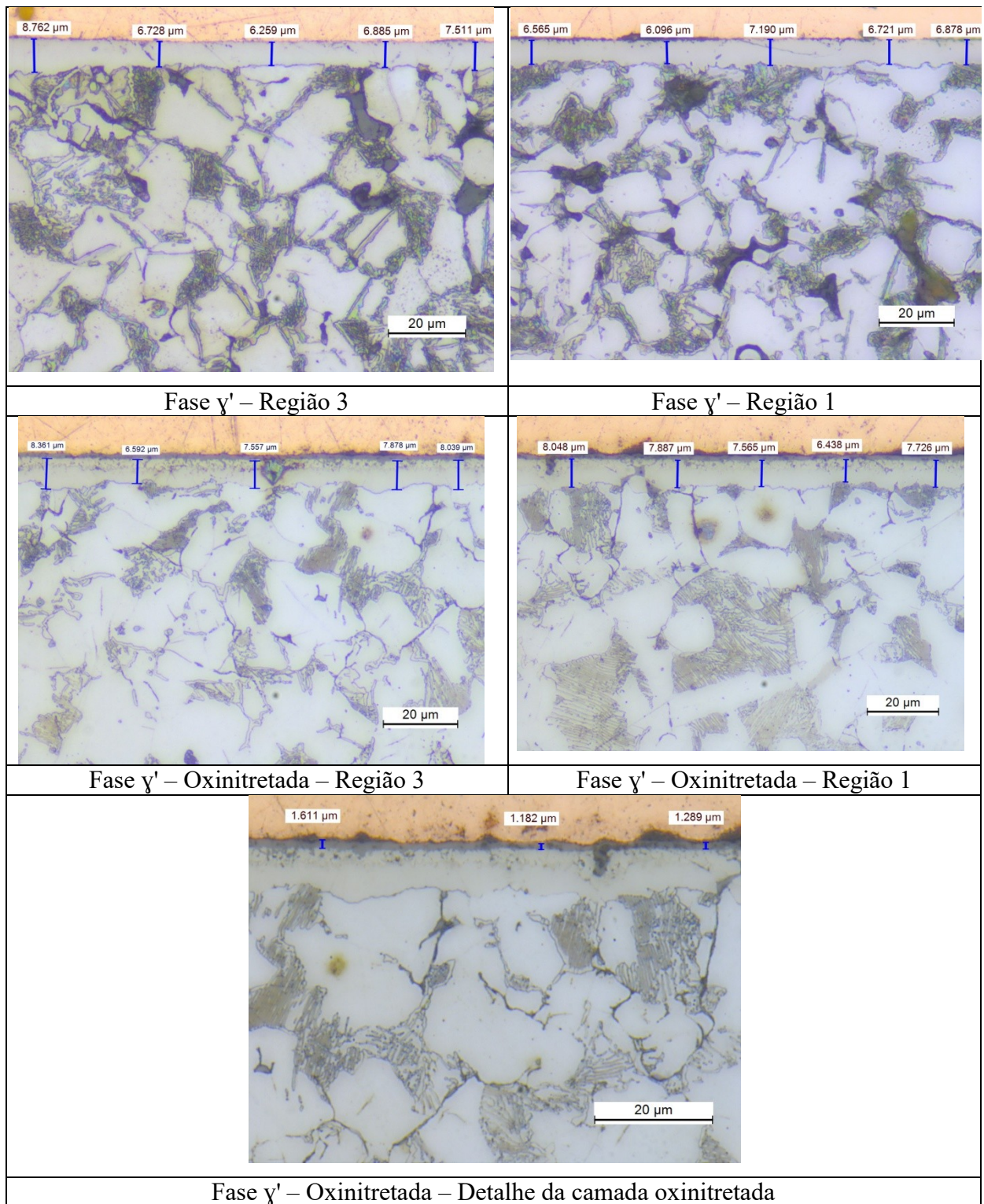
Tabela 8.4 - Espessura de camada oxinitretada Condição Fase γ' -Oxinitretada

Espessura da camada oxinitretada (μm)			
Região (R)	1	3	5
Média	1,39	1,29	1,29
DevPad	0,34	0,57	0,55
Média Geral	1,29		
Despad Geral	0,14		

Fonte: autoria própria

Os aspectos microestruturais das camadas obtidas nas duas condições de nitretação podem ser vistas nas imagens da figura 8.4. Percebe-se claramente a homogeneidade e a ausência de defeitos ao longo das camadas.

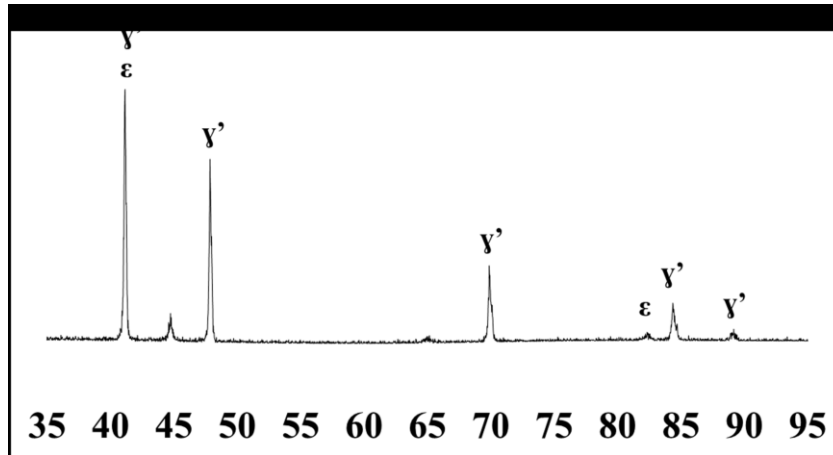
Figura 8.4 – Microestruturas das camadas obtidas nas duas condições de nitretação.



Fonte: autoria própria

A predominância da fase γ' nas duas condições foi confirmada pelo espectro de Raio-X da figura 8.5.

Figura 8.5 – Espectro de Raio - X



Fonte: autoria própria

8.1.2 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem constatar que a aplicação dos parâmetros de nitretação desenvolvidos na escala laboratorial alcançaram êxito em uma escala piloto.

Obteve-se as espessuras, fases de nitretos e ausência de defeitos como desejado.

As amostras obtidas serão utilizadas para os testes de desempenho tribológico apresentados a seguir.

8.2 DESEMPENHO TRIBOLOGICO

A avaliação do desempenho tribológico foi realizada em diferentes opções de nitretação, tanto as atualmente utilizadas nos olhais e bielas do compressor, que foram as referências, como as possíveis variações para uma nova especificação, foram realizadas em Tribômetro e em testes de confiabilidade em compressores.

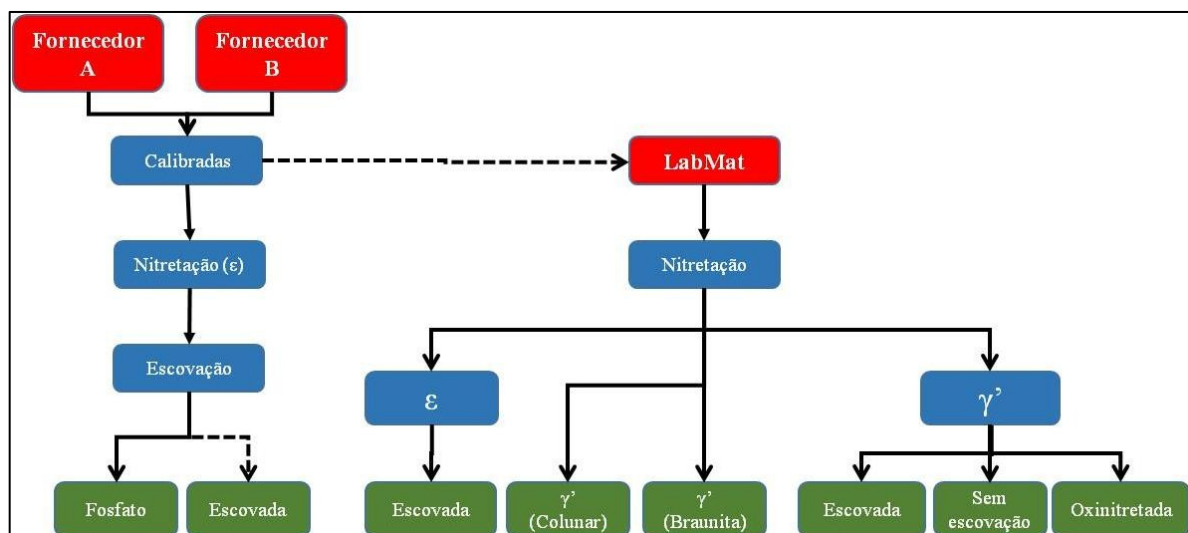
8.2.1 DESEMPENHO TRIBOLOGICO EM TRIBOMETRO

8.2.1.1 DESCRIÇÃO DOS TESTES.

Além da caracterização das novas camadas realizou-se uma ampla avaliação tribológico comparativa entre todas as soluções atualmente empregadas nas bielas do compressor, inclusive com peças nitretadas pelos 2 fornecedores atuais.

O esquema da figura 8.6 ilustra o espectro deste ranqueamento tribológico.

Figura 8.6 – Configurações de camadas nitretadas para ranqueamento.



Fonte: autoria própria

A opção “Fosfato”, apresentada no esquema da figura 8.6 refere-se à configuração de bielas em que é aplicada uma camada em torno de 1,0 μm de fosfato mangânico sobre a camada nitretada, em processo químico interno da Embraco. O objetivo da aplicação do fosfato mangânico é aumentar a lubricidade no par biela-pino do pistão, uma vez que os cristais de fosfato atuam na retenção do óleo lubrificante na superfície.

Como foram testadas peças dos dois fornecedores considerando 2 lotes de produção diferentes. O esquema da figura 8.6 é melhor detalhado na tabela 8.5.

Tabela 8.5 - Configurações de camadas nitretadas para ranqueamento.

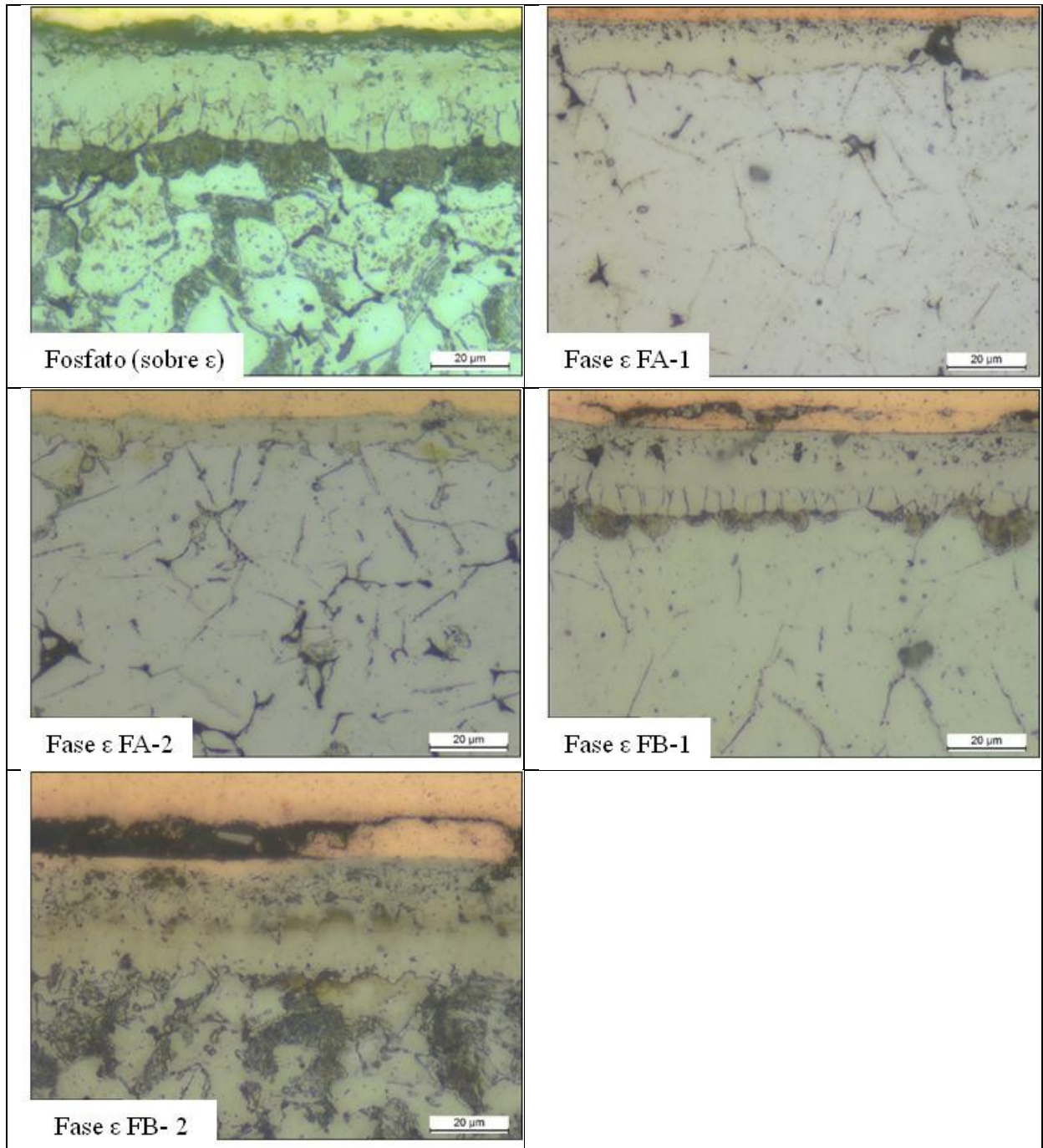
Identificação da Configuração da Camada	Origem do Processo de nitretação
Fosfato (sobre ϵ)	Fornecedor A
Fase ϵ FA-1	Fornecedor A – 1
Fase ϵ FA-2	Fornecedor A – 2
Fase ϵ FB-1	Fornecedor B – 1
Fase ϵ FB-2	Fornecedor B – 2
Fase ϵ Escovada	Labmat
Fase ϵ Colunar	Labmat
Fase γ' Braunita	Labmat
Fase γ' Escovada	Labmat
Fase γ'	Labmat
Fase γ' Oxinitretada	Labmat

Fonte: autoria própria

8.2.1.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

As micrografias ópticas de seção transversal das condições nitretadas nos dois fornecedores são apresentadas nas imagens da figura 8.7. Percebe-se uma variação tanto na espessura da camada, bem como presença de defeitos (braunita, microporosidade e crescimento colunar) entre os lotes do mesmo fornecedor, quanto entre os dois fornecedores.

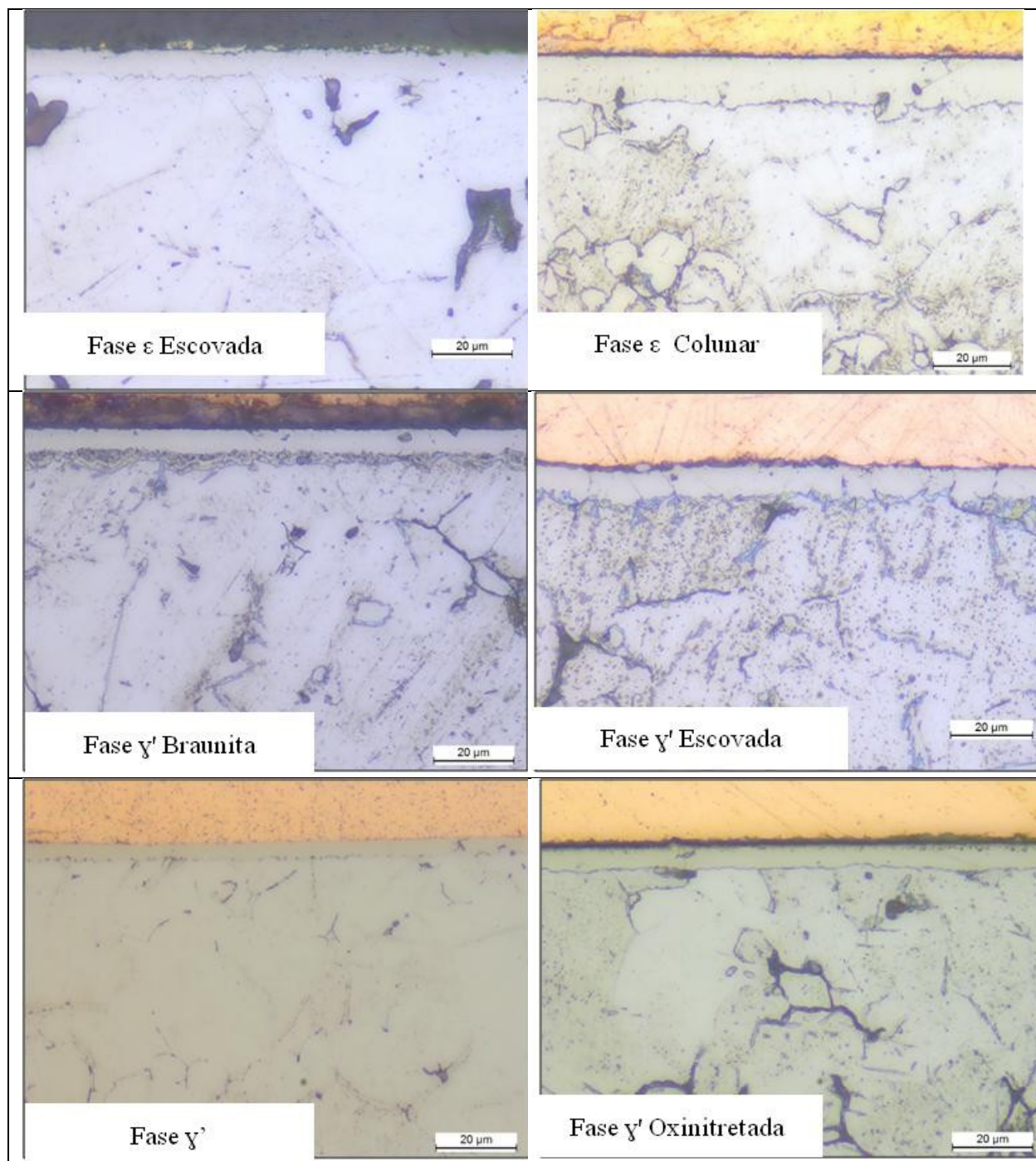
Figura 8.7 – Condições nitretadas nos fornecedores.



Fonte: autoria própria

As micrografias ópticas de seção transversal das condições nitretadas no Labmat são apresentadas nas imagens da figura 8.8. Percebe-se a homogeneidade na espessura das camadas nitretadas em todas as condições. E a presença de defeitos apenas nas condições de nitretação que foram utilizadas para produzi-los (fase γ' braunita e fase ϵ colunar).

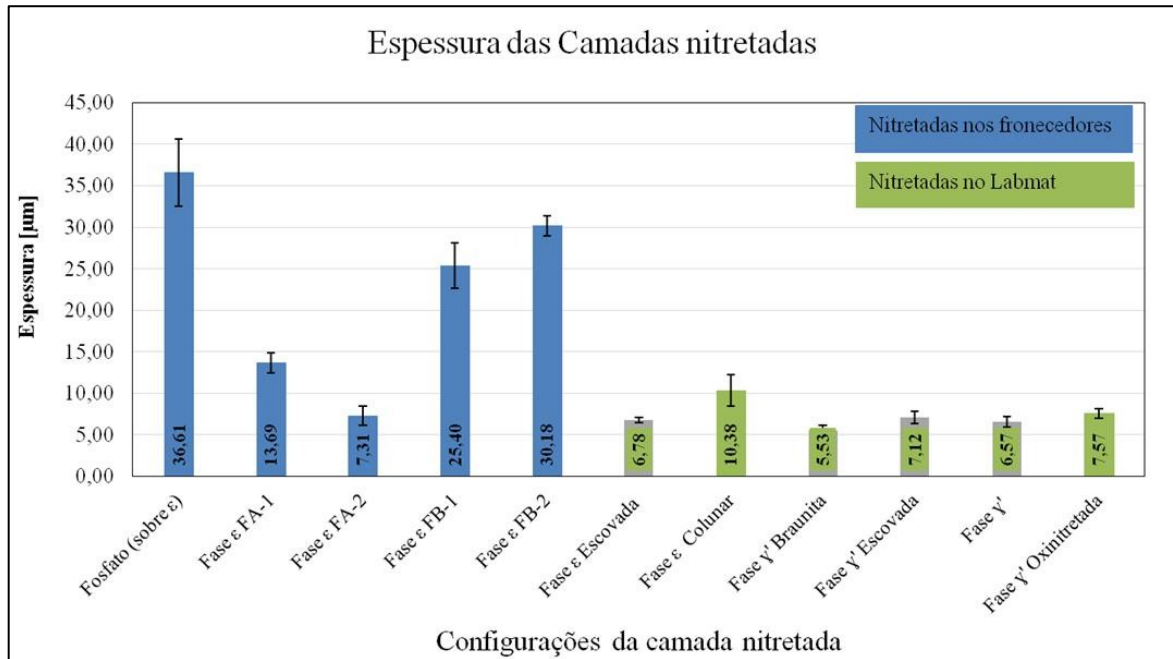
Figura 8.8 - Condições nitretadas no Labmat.



Fonte: autoria própria

Os valores médios para as espessuras de camada são apresentados no gráfico da figura 8.9

Figura 8.9 – Espessuras de camada nitretada nas diferentes condições de nitretação.



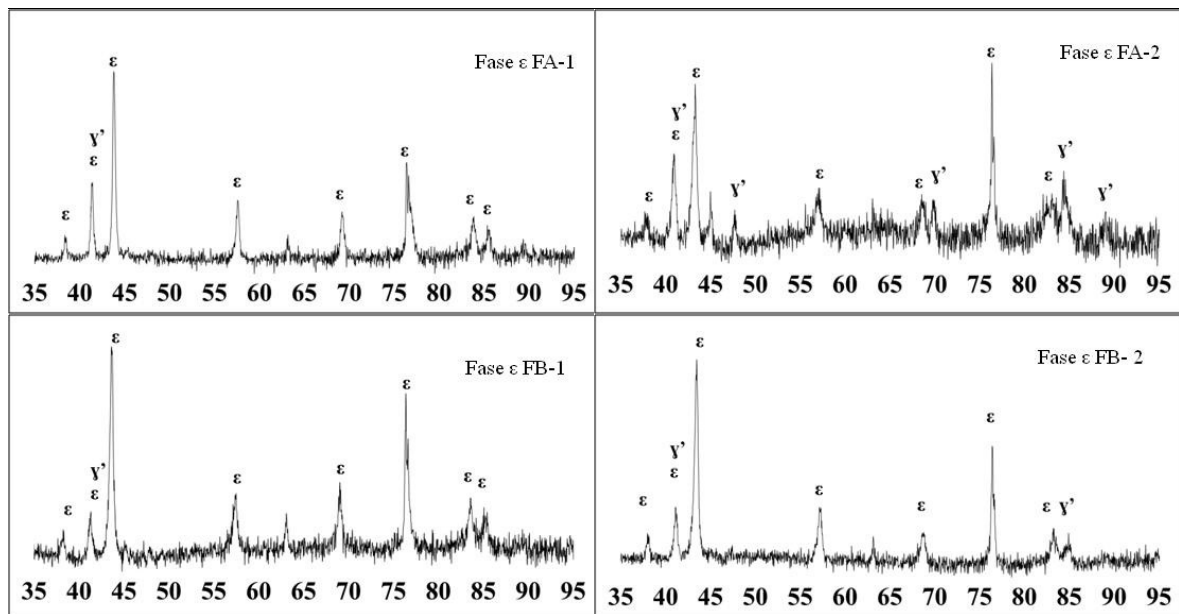
Fonte: autoria própria

No gráfico fica evidente a grande variabilidade na espessura das camadas obtidas nos processos dos fornecedores atuais. As grandes espessuras, juntamente com os defeitos visualizados nas imagens da figura 8.7, indicam a ocorrência de temperaturas acima do recomendado durante a nitretação (efeito de cátodo oco) e gradientes térmicos ao longo das cargas (maior que 25 °C) nestes lotes comerciais.

8.2.1.3 CARACTERIZAÇÃO DAS FASES DE NITRETOS

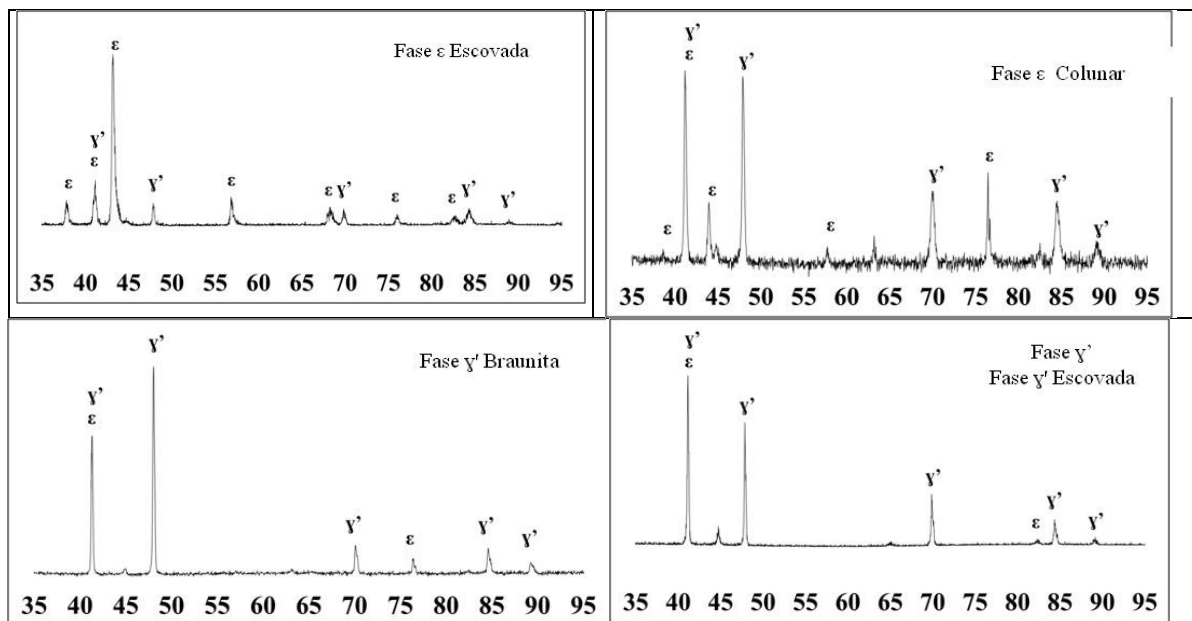
Os padrões de DRX, dos espécimes de nitretos, presentes em cada situação são apresentados na figura 8.10, para os fornecedores comerciais e figura 8.11 para os tratamentos no Labmat. Os fornecedores têm seus processos definidos para a obtenção da fase ϵ , o que é confirmado pelos espectros de Raio-X. Para as condições de nitretação no Labmat obtiveram-se as fases de nitretos projetadas.

Figura 8.10 – Fases de nitretos presentes na camadas nitretadas dos fornecedores.



Fonte: autoria própria

Figura 8.11 - Fases de nitretos presentes na camadas nitretadas no Labmat.

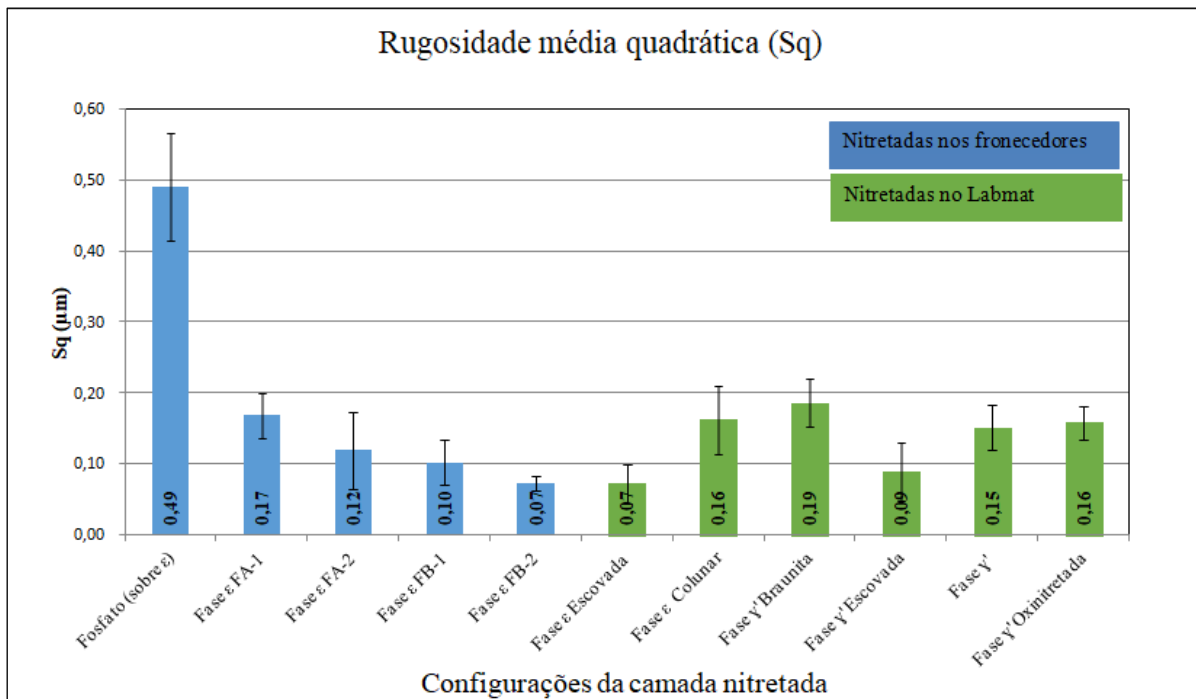


Fonte: autoria própria

8.2.1.4 CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA.

A topografia das superfícies das diferentes condições foi realizada via interferometria óptica de luz branca, usando a grandeza da rugosidade média quadrática (S_q) para caracterizá-las. Os resultados são apresentados no gráfico da figura 8.12.

Figura 8.12 - Rugosidade média quadrática (S_q).



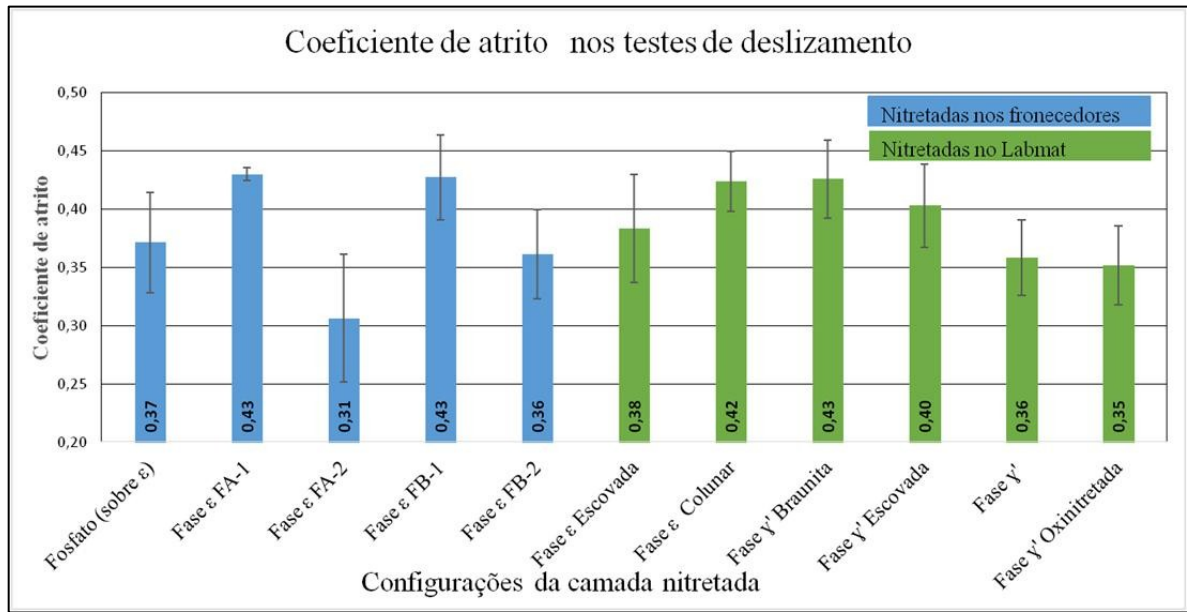
Fonte: autoria própria

8.2.1.5 RESULTADOS DO RANQUEAMENTO EM TRIBÔMETRO.

Os testes tribológicos em tribômetro foram realizados com 3 réplicas para cada ciclo de nitretação.

O gráfico da figura 8.13 apresenta os valores de coeficiente de atrito a seco no contato para as 11 configurações de camada. Não se identifica uma diferença significativa para o coeficiente de atrito entre as condições com variação média entre 0,31 e 0,43.

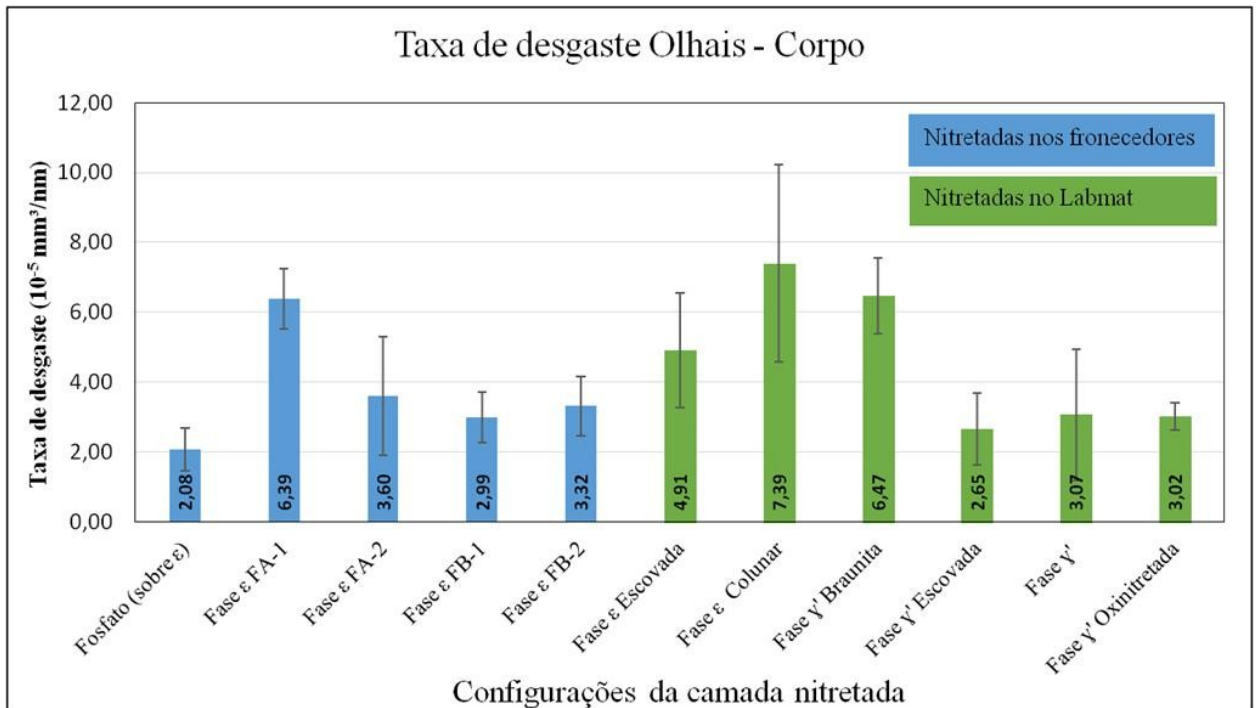
Figura 8.13 - Coeficiente de atrito do ranqueamento tribológico.



Fonte: autoria própria

As taxas de desgaste nos olhais nitretados (Corpo) são apresentadas no gráfico da figura 8.14.

Figura 8.14 – Taxa de desgaste nos olhais nitretados – CORPO.

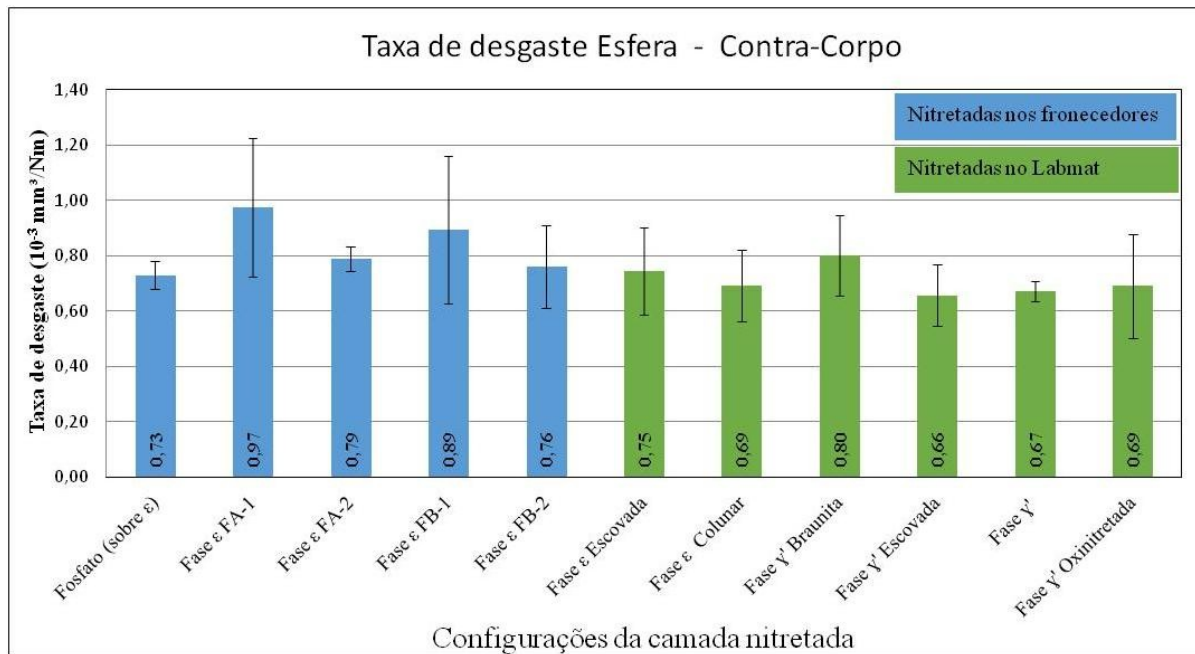


Fonte: autoria própria

Como esperado as condições com camada com defeitos (ϵ colunar e braunita), apresentaram as maiores taxas de desgaste. As camadas com as novas fases desenvolvidas (γ' escovada, γ' e γ' oxinitretada) apresentaram taxas de desgaste equivalentes tendendo a menores quando comparadas com as camadas atuais de fase ϵ (primeiras 6 colunas no gráfico 8.14). E por fim percebe-se a grande variabilidade de resultados nas condições dos fornecedores, tendência para maiores taxas de desgaste.

As taxas de desgaste das esferas (Contra-Corpo) são apresentadas na figura 8,15

Figura 8.15 - Taxa de desgaste nas esferas – CONTRA CORPO.

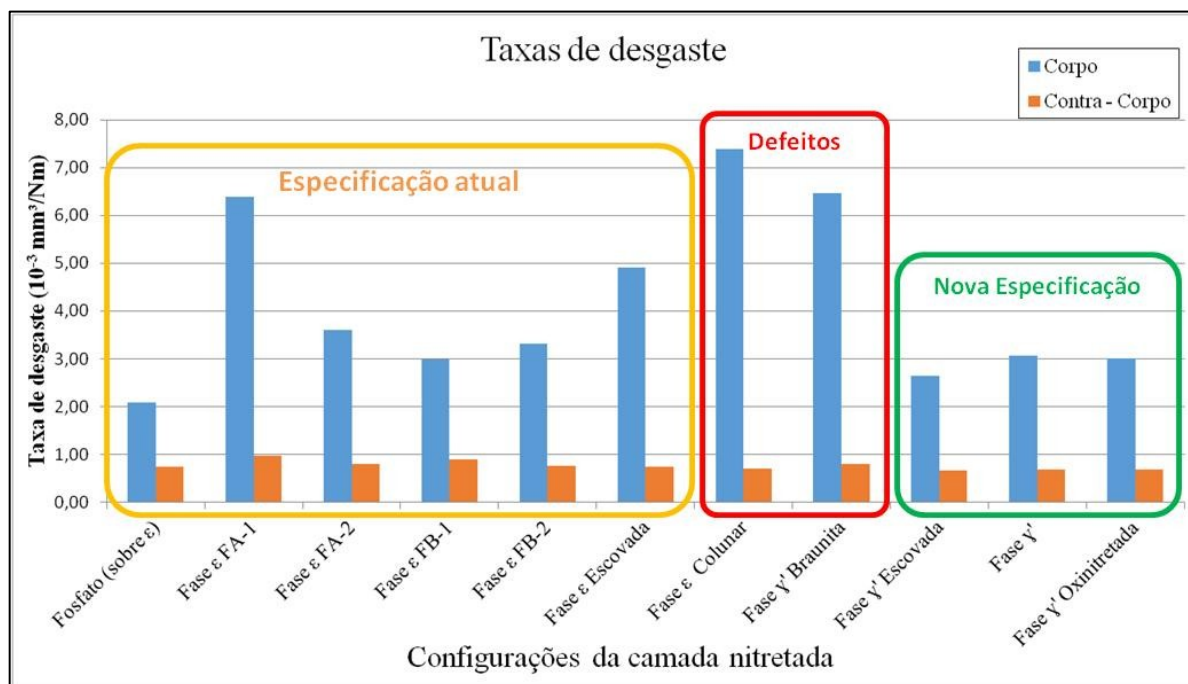


Fonte: autoria própria

As taxas de desgaste na esfera (contra-corpo), que equivale ao pino do pistão, são equivalentes em todas as condições, mas percebe-se uma tendência em serem maiores nas configurações com camada ϵ .

Também é interessante plotar as taxas de desgaste do CORPO e CONTRA-CORPO no mesmo gráfico, o que é apresentado na figura 8.16.

Figura 8.16 - Taxa de desgaste CORPO – CONTRA CORPO.



Fonte: autoria própria

É possível agrupar as 11 configurações em 3 grupos, como destacado no gráfico da figura 8.16 e observar a variabilidade entre os semelhantes. O grupo da nova especificação (Fase γ') é mais homogêneo quando comparado ao grupo da especificação atual (Fase ϵ), além de apresentar em uma média geral menor taxa de desgaste. O grupo da especificação atual apresenta resultados médios tendendo a equivaler aos resultados do grupo defeitos.

Assim pode-se concluir que o ranqueamento tribológico em testes de tribômetro demonstram que a nova especificação apresenta resultados médios da taxa de desgaste menores que a especificação atual, ou seja, maior resistência ao desgaste.

8.2.2 DESEMPENHO TRIBOLÓGICO EM COMPRESSORES

Com base nos resultados obtidos nos tratamentos das peças planejou-se um conjunto de testes de confiabilidade em compressores.

Os testes de confiabilidade (ou Testes Acelerados) em compressores foram realizados sempre de forma comparativa montando-se uma configuração conhecida como referência e à qual se comparam os resultados das novas configurações em avaliação.

Estes testes consideram o par tribológico biela-pino do pistão em conjunto.

8.2.2.1 DESCRIÇÃO DOS TESTES

Para a avaliação utilizou-se um teste de confiabilidade do tipo DESGASTE. No teste de desgaste o compressor é submetido às condições operacionais que induzem um sobre carregamento mecânico sobre os mancais do kit mecânico. Assim obtém-se um fator de aceleração para o desgaste nos mancais através do aumento da tensão de contato entre as superfícies dos mancais. O modelo do compressor, da biela, condições de testes e quantidades utilizadas são apresentados na tabela 8.6.

Tabela 8.6 - Modelo do compressor, da biela, condições de teste e quantidades

Modelo do Compressor	EM2Y 70H (R134a – Óleo ISO 10)
Modelo do Olhal Menor	01.335.1092 (9 mm)
Condição do Teste	Desgaste (-10°C / 90°C) / 500h
Número de compressores por condição	3 compressores
Total de compressores testados	24 compressores

Fonte: autoria própria

O plano de testes considera alguns fatores a serem avaliados para o par biela-pino do pistão. No olhal menor da biela, além de comparar a nova especificação de camada (γ') com a especificação atual (ϵ), avalio-se a etapa de escovação, a presença de camada de fosfato mangânico sobre as camadas nitretadas e a opção de oxinitretação. No pino do pistão avaliou-se duas opções, a especificação atual, na qual o pino é nitretado e outra com o pino somente temperado. Estes fatores estão listados na tabela 8.7.

Tabela 8.7 - Fatores a serem avaliados nos testes de desgaste.

FATORES A SEREM AVALIADOS	(-1)	(+1)
1 - Fase de nitreto	ϵ	γ'
2 - Escovação do olhal	Com	Sem
3 - Camada no olhal	Nitretada	Oxinitretada
4 - Fosfatização	Sem	Com
5 - Pino do pistão	Nitretado	Temperado

Fonte: autoria própria

Tendo os fatores de avaliação definidos foram elaboradas 8 configurações de montagens para os compressores a serem testados. Estas configurações são apresentadas na tabela 8.8 e serão testados 3 compressores em cada uma delas.

Tabela 8.8 – Configurações montadas em compressores

		PAR TRIBOLÓGICO				
		Biela				Pino do Pistão
FATORES		Fase de nitreto	Escovação do olhal	Camada no olhal	Fosfatização	Pino do pistão
CONFIGURAÇÕES DE MONTAGEM DOS COMPRESSORES	REFERÊNCIA	ϵ	COM	NITRETADA	SEM	NITRETADO
	A	γ'	COM	NITRETADA	SEM	NITRETADO
	B	γ'	SEM	NITRETADA	SEM	NITRETADO
	C	γ'	SEM	NITRETADA	SEM	TEMPERADO
	D	γ'	SEM	NITRETADA	COM	NITRETADO
	E	γ'	SEM	NITRETADA	COM	TEMPERADO
	F	γ'	SEM	OXINITRETO	SEM	NITRETADO
	G	γ'	SEM	OXINITRETO	SEM	TEMPERADO

Fonte: autoria própria

Além da avaliação do desempenho tribológico de cada configuração em si, foi possível realizar as análises comparativas específicas descritas na tabela 8.9.

Tabela 8.9 – Avaliações específicas entre as configurações.

AVALIAÇÕES ESPECÍFICAS ENTRE AS CONFIGURAÇÕES DE MONTAGEM	
CONFIGURAÇÕES	OBJETIVO
Referência versus A	Avaliação da resistência ao desgaste no olhal: Fase ϵ (escovada) versus Fase γ'
A versus B	Avaliação da eliminação da escovação após a nitretação com o uso da Fase γ'
B versus C	Avaliação do uso de pino do pistão somente temperado (atual é nitretado) contra biela Fase γ' (substituir o pino nitretado pelo pino temperado é desejável: redução de custos)
B versus D	Avaliação do benefício do uso da fosfatização sobre a camada nitretada do olhal com Fase γ' e pino do pistão nitretado (eliminar a fosfatização é desejável: elimina um processo e reduz custos)
C versus E	Avaliação do benefício do uso da fosfatização sobre a camada nitretada do olhal com Fase γ' e pino do pistão temperado (eliminar a fosfatização é desejável: elimina um processo e reduz custos)
D versus E	Avaliação do uso de pino do pistão somente temperado em comparação com o pino nitretado quando se usa a fosfatização sobre a camada nitretada Fase γ'
F versus B	Avaliação da resistência ao desgaste da Fase γ' versus Fase γ' oxinitretada quando se usa pino do pistão nitretado.
G versus C	Avaliação da resistência ao desgaste da Fase γ' versus Fase γ' oxinitretada quando se usa pino do pistão somente temperado.

Fonte: autoria própria

Cabe lembrar que além da nova especificação (Fase γ') buscar melhorar a confiabilidade tribológica das bielas, também existe o objetivo de se obter ganhos econômicos com a redução de custos de uma nova configuração para o par tribológico biela – pino do pistão. As 8 configurações de compressores testadas permitiram avaliar mais de uma opção para uma solução final.

8.2.2.2 RESULTADOS DOS TESTES EM COMPRESSOR

Após a realização dos testes de Desgaste durante 500h, os compressores são desmontados e todos os seus componentes são avaliados pela equipe de analistas do Laboratório de Tribologia, segundo procedimentos e normas internas da Embraco,.

Os resultados obtidos, bem como os critérios de avaliação, para os componentes Olhal Menor da biela e Pino do Pistão estão sintetizados na tabela 8.10.

Tabela 8.10- Resultados dos testes de desgaste de 500 h em compressores

CONFIGURAÇÃO	COMPONENTES								RESULTADO
	Olhal menor				Pino do pistão				
REFERÊNCIA	1	2	3	IS	1	2	3	IS	Aprovado
	2 PO	1 PO	1 PO	2,2	1 PO	1 PO	1 PO	1,0	
A	4	5	6	IS	4	5	6	IS	Aprovado
	1 PO	1 PO	1 PO	1,0	1 PO	1 PO	1 PO	1,0	
B	7	8	9	IS	7	8	9	IS	Aprovado
	1 PO	1 PO	2 PO	2,2	1 PO	1 PO	1 PO	1,0	
C	10	11	12	IS	10	11	12	IS	Reprovado
	1 PO	1 PO	3 AD	3,0	1 PO	2 PO	3 AD	3,3	
D	13	14	15	IS	13	14	15	IS	Aprovado
	1 PO	1 PO	2 PO	2,2	1 PO	1 PO	1 PO	1,0	
E	16	17	18	IS	16	17	18	IS	Reprovado
	1 PO	1 PO	3 AD	3,0	1 PO	2 PO	2 PO	2,7	
F	19	20	21	IS	19	20	21	IS	Aprovado
	1 PO	1 PO	1 PO	1,0	1 PO	1 PO	1 PO	1,0	
G	22	23	24	IS	22	23	24	IS	Aprovado
	1 PO	1 PO	1 PO	1,0	1 PO	1 PO	1 PO	1,0	

Definição das Classificações de Desgaste		
Grau de Severidade do Desgaste	Mecanismo de Desgaste	Índice de Severidade (IS)* (Critério de Aprovação)
1 - Brando	AD - Adesão	≤ 3 - Satisfatório
2 - Moderado	RI - Riscamento	> 3 - Insatisfatório
3- Severo	PO - Polimento	*(Equação Empírica, não publicável)

Fonte: autoria própria

O conjunto de análises visuais e dimensionais realizadas após os testes de confiabilidade permite dizer que:

- Configurações C e E estão rejeitadas, uma vez que o índice de severidade foi maior do que 3. E todas as demais configurações estariam aprovadas.
- Dentre as aprovadas as configurações A, F e G apresentaram os melhores resultados (IS= 1,0) nos dois componentes, resultado melhor que a referência.

Analisando os objetivos específicos na comparação dos fatores de análise listados na tabela 8.9, sintetizam-se as conclusões na tabela 8.11.

Tabela 8.11 – Conclusões com relação às avaliações específicas entre as configurações

AVALIAÇÕES ESPECÍFICAS ENTRE AS CONFIGURAÇÕES DE MONTAGEM		
CONFIGURAÇÕES	OBJETIVO	CONCLUSÕES
Referência versus A	Avaliação da resistência ao desgaste no olhal: Fase ϵ (escovada) versus Fase γ' (escovada)	A Fase γ' (escovada) apresentou <u>maior</u> resistência ao desgaste que a Fase ϵ (escovada)
A versus B	Avaliação da eliminação da escovação após a nitretação com o uso da Fase γ'	As duas apresentaram resultado aprovado, mas a Fase γ' (escovada) apresentou maior resistência ao desgaste que Fase γ' (não escovada), mas a eliminação da escovação é possível
B versus C	Avaliação do uso de pino do pistão somente temperado (atual é nitretado) contra biela Fase γ' (substituir o pino nitretado pelo pino temperado é desejável: redução de custos)	A configuração C não foi aprovada, indicando que o uso de <u>pino de pistão somente temperado não é viável</u> com a Fase γ' sem escovação.
B versus D	Avaliação do benefício do uso da fosfatização sobre a camada nitretada do olhal com Fase γ' e pino do pistão nitretado (eliminar a fosfatização é desejável: elimina um processo e reduz custos)	As duas foram aprovadas com resultados idênticos, indicando que o uso da <u>fosfatização</u> sobre a camada com Fase γ' sem escovação <u>não traz benefícios</u> e pode ser eliminada.
C versus E	Avaliação do benefício do uso da fosfatização sobre a camada nitretada do olhal com Fase γ' e pino do pistão temperado (eliminar a fosfatização é desejável: elimina um processo e reduz custos)	As duas foram reprovadas indicando que usar ou não a <u>fosfatização não viabiliza</u> o uso do pino de pistão somente temperado
D versus E	Avaliação do uso de pino do pistão somente temperado em comparação com o pino nitretado quando se usa a fosfatização sobre a camada nitretada Fase γ'	A configuração E foi reprovada, corroborando que o uso do <u>pino do pistão somente temperado não é viável</u> , mesmo com a biela fosfatizada.
F versus B	Avaliação da resistência ao desgaste da Fase γ' versus Fase γ' oxinitretada quando se usa o pino do pistão nitretado.	As duas foram aprovadas, mas a F (oxinitretada) apresentou maior resistência ao desgaste que a B (Fase γ')
G versus C	Avaliação da resistência ao desgaste da Fase γ' versus Fase γ' oxinitretada quando uso pino do pistão somente temperado.	A configuração C foi reprovada (pino temperado), mas a condição G foi aprovada mostrando que o uso <u>do pino do pistão somente temperado é viável</u> com a Fase γ' <u>oxinitretada</u> .

Fonte: autoria própria

8.3 CONCLUSÕES

Considerando os resultados dos testes de desgaste de 500 h conclui-se que a uma nova especificação para a camada nitretada com a Fase γ' é viável e está APROVADA.

Além disso, ela permite variações para a configuração final do par Biela – Pino do Pistão que permitem aumentar as possibilidades de redução de custos do conjunto.

A três variações aprovadas são:

1. Configuração G: nitreto fase γ' sem escovação e sem fosfato + oxidação, + pino do pistão somente temperado.

- Maior rentabilidade: eliminação da escovação, da fosfatização e substituição de um pino do pistão nitretado por um pino somente temperado.
- A rugosidade do pino temperado testado é maior que no nitretado. Mesmo assim os resultados foram aceitáveis.
- Melhores resultados tribológicos.

2. Configuração B: nitreto fase γ' , sem escovação e sem fosfato + pino nitretado.

- Média rentabilidade: eliminação da escovação, da fosfatização, mas mantém o pino do pistão nitretado.
- Resultados tribológicos limítrofes para esta opção com alguns valores dimensionais ligeiramente acima do especificado. Porém os resultados são aceitáveis.

3. Configuração D: nitreto fase γ' , sem escovação, com fosfato + pino nitretado.

- Menor rentabilidade: elimina-se somente a escovação, mantendo a fosfatização e o pino do pistão nitretado.
- Resultados tribológicos e limítrofes para esta opção com alguns valores dimensionais ligeiramente acima do especificado. Porém os resultados são aceitáveis.

9 RESULTADOS E DISCUSSÕES: FASE DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO.

Esta fase final consiste em homologar o reator em escala industrial, utilizando um novo desenho de suporte com cargas completas de peças.

Consiste no escalonamento da condição de nitretação da nova especificação para uma escala industrial, onde serão testados lotes com milhares de peças.

O projeto (não é escopo desta tese) do novo suporte de peças teve como objetivo maximizar a capacidade de carga atendendo requisitos ótimos de ergonomia para os operadores do equipamento.

Condições operacionais, gradientes térmicos e variações na espessura de camada nitretada foram avaliados para validar a aplicação da solução em escala industrial, tendo como fatores críticos:

- a) controle do plasma (ausência de catodo oco, desvios de qualidade por parâmetros de processo);
- b) a variabilidade ao longo da carga e entre ciclos para obtenção da camada especificada.

9.1 DESCRIÇÃO DO REATOR.

O reator de nitretação industrial é um equipamento disponível no Labmat e seu aspecto geral pode ser visto na imagem da figura 9.1.

Figura 9.1 - – Reator industrial instalado no LabMat.



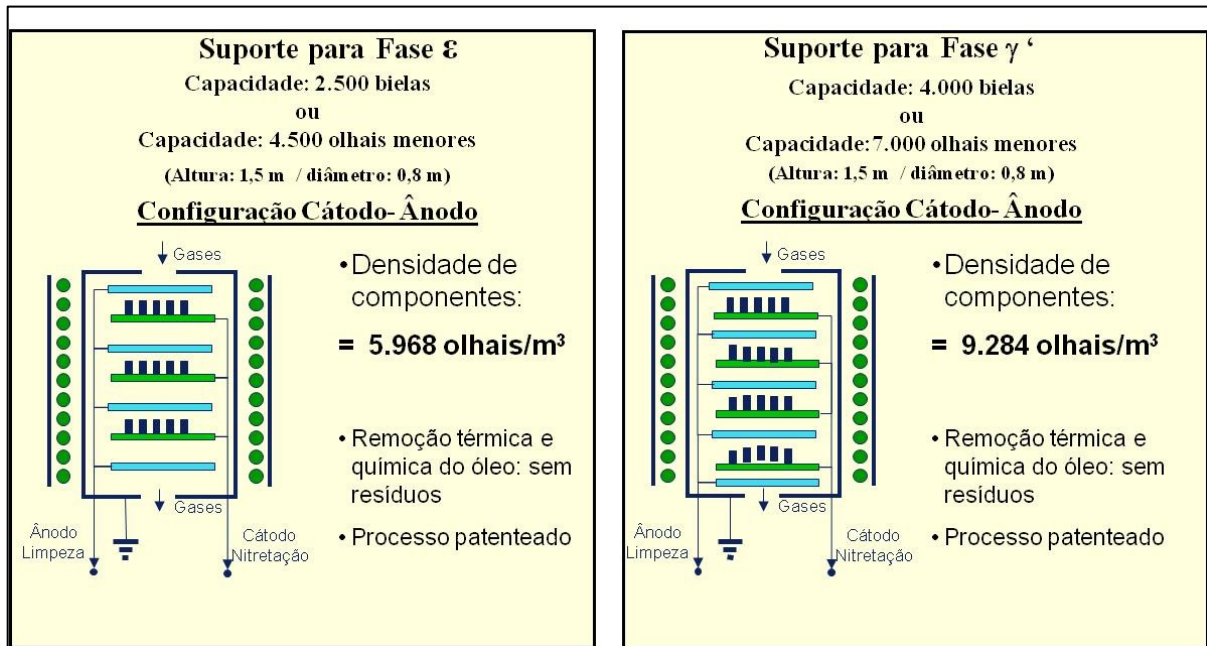
Fonte: autoria própria

Este equipamento possui um suporte de peças desenvolvido para a nitretação de bielas com camada branca de fase ϵ , especificação atual, e sua capacidade de carga é a referência hoje usada.

Como já visto anteriormente, a nova especificação objetiva uma fase γ' que é obtida com uma mistura gasosa pobre em nitrogênio, característica que demanda menos potência do equipamento e permite aumentar a carga de peças no mesmo volume de tratamento.

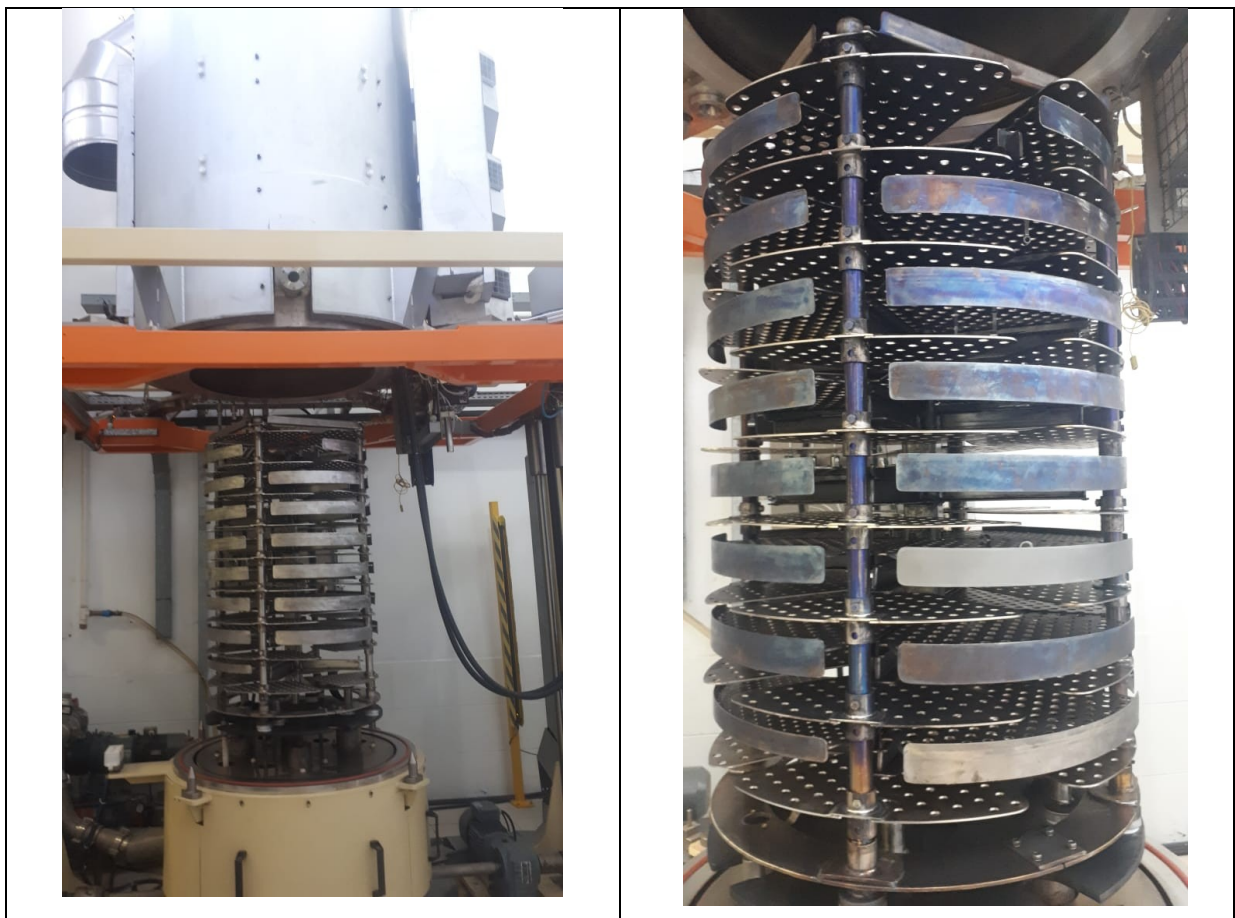
A figura 9.2 ilustra a diferença entre os 2 suportes e as imagens da figura 9.3 a montagem do novo suporte no reator.

Figura 9.2 – Comparação entre os suportes de peças.



Fonte: autoria própria

Figura 9.3 – Suporte de peças montado no reator



Fonte: autoria própria

9.2 DESCRIÇÃO DOS TESTES

Foram realizados três ciclos de tratamento de nitretação com cargas de 7.000 olhais cada, na condição de nitretação para fase γ' conforme aprovada na fase anterior, ou seja:

Especificação:

Camada branca monofásica γ' (Fe_4N), com espessura homogênea $\geq 6 \mu\text{m}$.

Parâmetros de nitretação que atenderam à especificação.

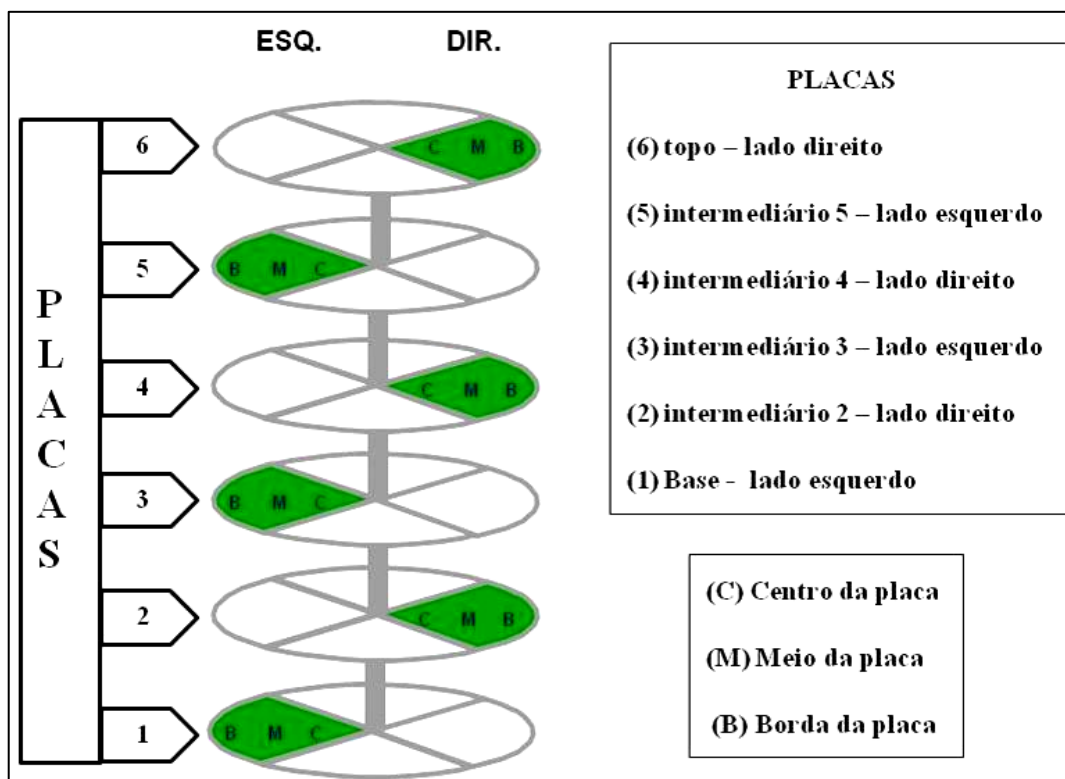
- Tensão de saída: 500 V
- Pressão: 266 Pa (2,0 Torr)
- Temperatura de Patamar: 540 °C
- Mistura Gasosa: (30% N_2 + 70% H_2)

Após a realização dos ciclos de nitretação foram retiradas peças de posições pré-determinadas para as análises.

As regiões de coleta das amostras para análise foram definidas de forma a mapear as variações microestruturais e térmicas ao longo da carga. Os pontos de coleta estão esquematizados na figura 9.4 e são representados pelos pontos (C) – Centro da placa; (M) – Meio da placa e (B) – Borba da placa, em distintos níveis e lados do suporte.

Vários termopares foram instalados nas diferentes regiões do suporte a fim determinarem-se os gradientes de temperatura ao longo da carga.

Figura 9.4 - Esquema de distribuição da carga de peças no equipamento: (a) regiões em que foram retiradas peças para análise no sentido longitudinal da carga, ou seja, entre bandejas do suporte; (b) regiões em que foram retiradas peças para análise no sentido radial da carga, ou seja, na bandeja do suporte.

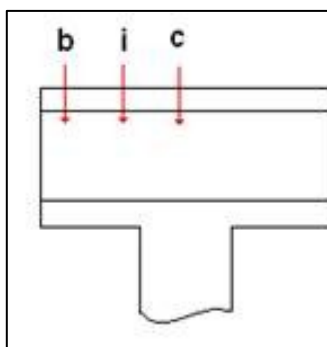


Fonte: autoria própria

A espessura da camada de compostos foi determinada em três diferentes regiões da peça, conforme visualizado na figura 9.5, com o objetivo de verificar também a homogeneidade da camada ao longo do componente. Para cada posição nas placas o valor da espessura da camada foi determinado pela média das três regiões em três diferentes peças.

Figura 9.5 -Regiões da peça em que foi determinada a espessura da camada de compostos:

b = borda (2 mm da borda); **i** = região intermediária; **c** = região central do olhal



Fonte: autoria própria

A repetibilidade do processo se dará comparando-se os resultados dos 3 distintos ciclos de nitretação.

9.3 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL.

As amostras coletadas nas diferentes posições do reator foram analisadas microestruturalmente, tendo como foco dois parâmetros: espessura da camada de compostos e fases de nitretos.

9.3.1 RESULTADOS DA ESPESSURA DE CAMADA BRANCA

As tabelas 9.1, 9.2 e 9.3 apresentam os valores médios da espessura da camada de compostos nas diferentes regiões da carga dos três ciclos de nitretação realizados, bem como o valor médio do gradiente térmico medido entre as placas (altura da carga) e radial à carga (variação da mesma placa).

Pode-se observar que a espessura da camada de compostos é bastante homogênea ao longo da carga tanto no sentido radial quanto no sentido longitudinal.

Em todas as regiões da carga a camada branca apresentou espessura dentro do especificado ($\geq 6,00 \mu\text{m}$) para este componente. O resultado é o mesmo quando se compara as 3 cargas distintas.

Outro ponto importante avaliado foi o gradiente térmico ao longo da carga, que se mostrou bastante homogêneo e dentro das margens aceitáveis para o processo (menor que 25 °C), nas 3 cargas.

Tabela 9.1 – Espessura da camada branca e gradiente térmico ao longo da Carga 1 de 7.000 peças.

		CARGA 1				
		Espessura da camada (μm) - Posição na Placa -			ΔT na placa ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT entre as placas 1 e 6 ($^{\circ}\text{C}$)
		Centro (C)	Meio (M)	Borda (B)		
P L A C A	1	$6,8 \pm 0,5$	$6,4 \pm 0,3$	$6,5 \pm 0,4$	6 ± 3	17 ± 5
	2	$7,0 \pm 0,9$	$7,2 \pm 0,8$	$6,6 \pm 0,5$	7 ± 2	
	3	$6,9 \pm 0,4$	$6,3 \pm 0,2$	$6,8 \pm 0,4$	5 ± 2	
	4	$6,4 \pm 0,3$	$7,2 \pm 0,4$	$7,1 \pm 0,4$	9 ± 3	
	5	$6,7 \pm 0,3$	$7,2 \pm 0,5$	$6,7 \pm 0,6$	8 ± 3	
	6	$7,3 \pm 0,6$	$6,5 \pm 0,3$	$7,2 \pm 0,4$	6 ± 3	

Fonte: autoria própria

Tabela 9.2 – Espessura da camada branca e gradiente térmico ao longo da carga 2 de 7.000 peças.

		CARGA 2				
		Espessura da camada (μm) - Posição na Placa -			ΔT na placa ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT entre as placas 1 e 6 ($^{\circ}\text{C}$)
		Centro (C)	Meio (M)	Borda (B)		
P L A C A	1	$6,3 \pm 0,2$	$6,4 \pm 0,4$	$6,4 \pm 0,2$	9 ± 3	18 ± 5
	2	$7,0 \pm 0,9$	$6,9 \pm 1,0$	$7,1 \pm 0,8$	7 ± 4	
	3	$6,7 \pm 0,7$	$6,5 \pm 0,4$	$6,9 \pm 0,6$	8 ± 4	
	4	$7,4 \pm 0,6$	$7,3 \pm 0,6$	$6,5 \pm 0,5$	12 ± 3	
	5	$7,5 \pm 0,9$	$7,1 \pm 0,8$	$6,9 \pm 0,8$	9 ± 5	
	6	$7,1 \pm 1,0$	$6,5 \pm 0,3$	$7,2 \pm 0,4$	8 ± 3	

Fonte: autoria própria

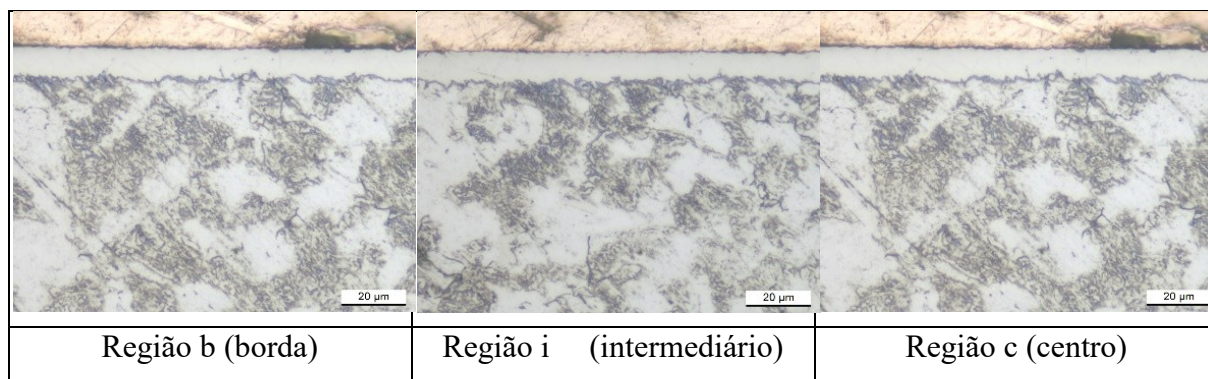
Tabela 9.3 – Espessura da camada branca e gradiente térmico ao longo da carga 3 de 7.000 peças.

		CARGAS 3				
		Espessura da camada (μm) - Posição na Placa -			ΔT na placa ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT entre as placas 1 e 6 ($^{\circ}\text{C}$)
		Centro (C)	Meio (M)	Borda (B)		
P L A C A	1	$7,0 \pm 0,9$	$6,4 \pm 0,3$	$6,5 \pm 0,4$	7 ± 2	15 ± 7
	2	$6,6 \pm 0,5$	$7,2 \pm 0,8$	$6,6 \pm 0,5$	8 ± 3	
	3	$6,7 \pm 0,7$	$6,6 \pm 0,2$	$6,8 \pm 0,7$	10 ± 2	
	4	$7,1 \pm 1,0$	$7,1 \pm 0,8$	$7,1 \pm 0,7$	9 ± 2	
	5	$6,9 \pm 0,5$	$7,0 \pm 1,0$	$6,7 \pm 0,6$	11 ± 3	
	6	$7,3 \pm 1,2$	$7,4 \pm 0,5$	$6,8 \pm 0,6$	9 ± 4	

Fonte: autoria própria

Nas imagens da figura 9.6 observam-se as micrografias das três diferentes regiões de uma das peças analisadas. As camadas apresentaram-se compactas e homogêneas ao longo do comprimento do olhal e as imagens são representativas de todas as peças nas 3 cargas.

Figura 9.6 - Micrografia da camada de compostos nas 3 diferentes regiões de análise da peça

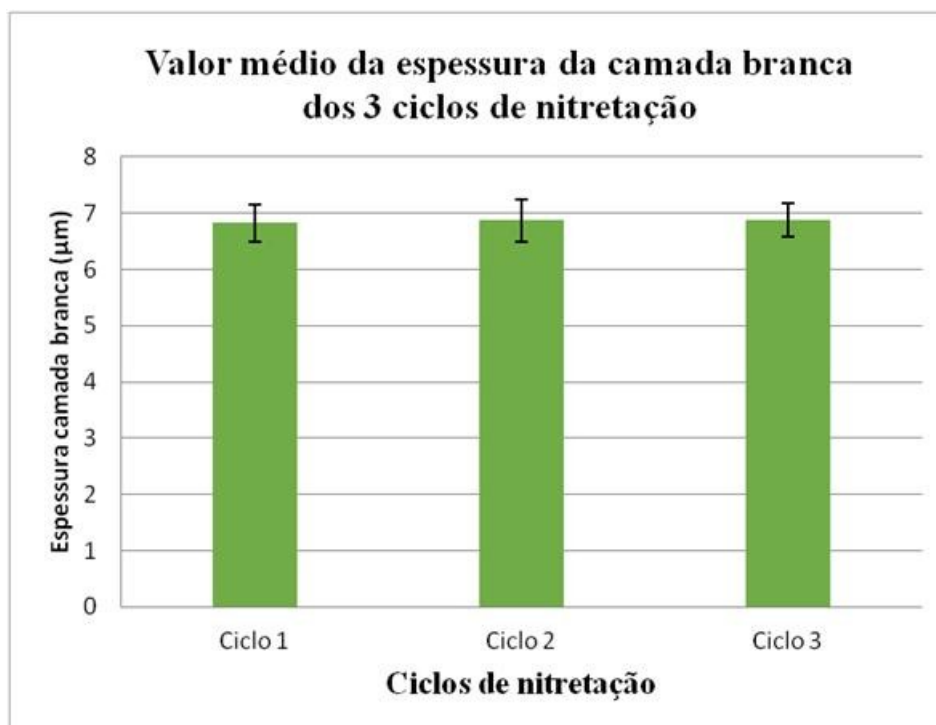


. Fonte: autoria própria

Após a verificação da homogeneidade da espessura da camada ao longo da carga foi realizada uma comparação entre as cargas com o objetivo de avaliar a repetibilidade do processo. Para isto foi determinado um valor médio para a carga total do ciclo utilizando todas as medidas de espessura de camada realizadas. O mesmo procedimento foi realizado nos três ciclos de tratamento e os resultados podem ser visualizados na figura 9.7. Uma análise de variância aplicada aos resultados demonstra que os mesmos podem ser

considerados dentro da mesma faixa demonstrando a repetibilidade do processo de nitretação nos três ciclos realizados.

Figura 9.7 - Valor médio da espessura da camada branca dos 3 ciclos de nitretação com carga completa.



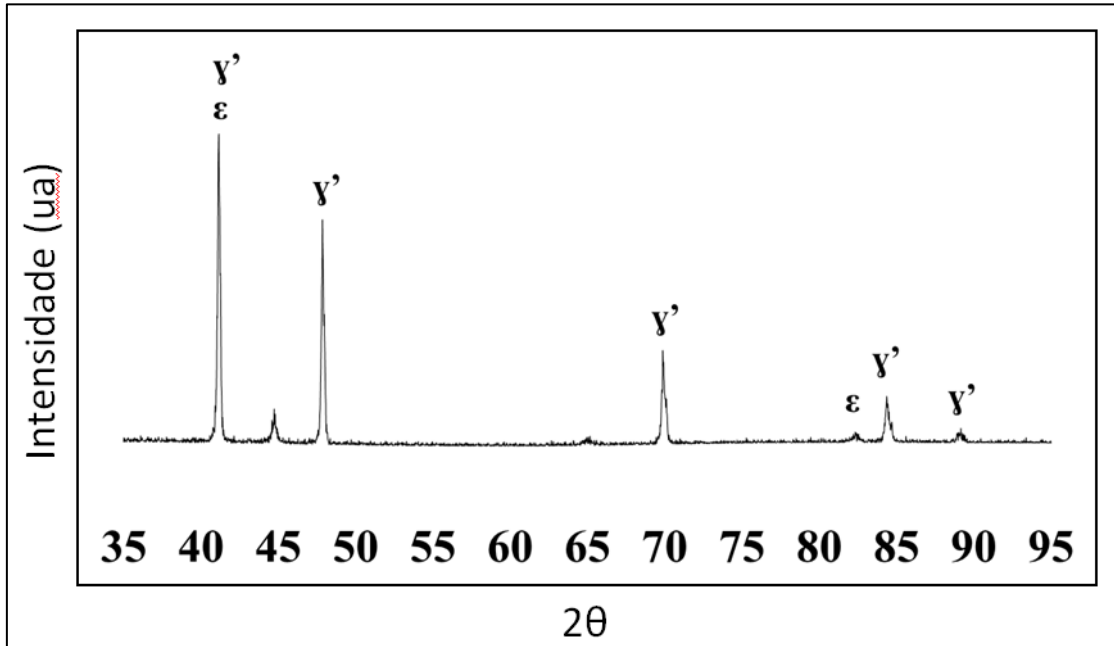
Fonte: autoria própria

9.3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS FASES DE NITRETOS DAS CAMADAS NITRETADAS

Outra técnica utilizada para avaliar a microestrutura das camadas nitretadas foi a difratometria de raios – X. Peças das diferentes posições ao longo da carga e nos três ciclos de nitretação foram analisadas e a fase de nitreto encontrada sempre foram predominantemente a fase γ' , que é a desejada para este componente conforme resultados mostrados anteriormente.

Na figura 9.8 é visualizado um espectro de difratograma de raios-X típico de uma das peças nitretadas.

Figura 9.8 - Espectro de raio-X típico das amostras nitretadas durante os experimentos de carga completa



Fonte: autoria própria

Em função dos resultados microestruturais se mostrarem homogêneos, pode-se afirmar que toda a carga possui as mesmas características microestruturais. Ou seja, todas as 7.000 peças possuem as mesmas características microestruturais.

9.4 AVALIAÇÃO ECONÔMICA NA ESCALA INDUSTRIAL.

Com os resultados técnicos positivos nos testes do processo em escala industrial realizou uma avaliação econômica para a implantação de uma especificação para a camada nitretada com a Fase γ' .

Esta análise se concentrará apenas nos custos da nitretação sem incluir possíveis reduções de custos advindas da eliminação de processos como a escovação e fosfatização, e nem pela troca de componentes do par biela – pino do pistão, como trocar o pino nitretado por pino somente temperado.

Para a quantificação dos custos do processo considerou-se as variáveis listadas na tabela 9.4.

Tabela 9.4 - Descrição das variáveis de custos.

Descrição das Variáveis de custo
Mão de Obra Direta
Salário Anual / Pessoa
Número de Pessoas
Volume de peças no reator
Gastos Variáveis
Energia Elétrica
Gases
Outras variáveis (Gastos Gerais de Fabricação)
Volume de peças no reator
Gastos Fixos
Mat.Manutenção
Volume de peças no reator
Despesas
Administrativas
Comerciais Fixas

Fonte: autoria própria

A variável mais relevante para o resultado econômico na nitretação esta relacionada com o aumento da capacidade de carga do reator quando se migra da fase ϵ , para a fase γ' .

Como se esta tralhando com dois componentes similares da função, bielas e olhais, mas com dimensões diferentes as capacidades de carga no reator também são distintas. O

aumento da produtividade para cada componente com a adoção da nitretação em fase γ' em substituição à fase ϵ , é apresentada na tabela 9.5.

Tabela 9.5 – Ganhos de produtividade no reator de nitretação

	Quantidade de peças na carga	
	Biela	Olhal Menor
Carga de peças com nitretação em fase ϵ	2.500	4.500
Carga de peças com nitretação fase γ'	4.000	7.000
Aumento de produtividade	62,50%	64,29%

Fonte: autoria própria

Considerando estas capacidades e os valores dos custos de processo calcularam-se os resultados econômicos com a implantação da nova especificação fase γ' , em relação à especificação atual com fase ϵ . Os resultados estão na tabela 9.6, na qual os valores absolutos são omitidos. Como a divulgação de valores econômicos absolutos é sensível ao negócio da empresa somente serão apresentados valores percentuais dos resultados

Tabela 9.6 – Ganhos econômicos com a adoção da especificação com fase γ' ,

	Biela	Olhal Menor
Nitretação em fase ϵ (U\$/peça)	X	Z
Nitretação fase γ' (U\$/peça)	Y	W
Redução de custos/peça (U\$)	0,0344	0,0363
Redução de custo (%)	48,66%	27,40%

Fonte: autoria própria

Percebe-se um valor percentual de redução de custos muito expressivo. Pode chamar a atenção o fato da redução de custos por peça ser de poucos centavos, mas se considerar que a empresa consome em torno de 20 milhões de componentes nitretados por ano o valor total é bem expressivo.

9.5 CONCLUSÕES

Encerrando a fase de Desenvolvimento do Processo sintetizamos as seguintes conclusões:

- A aplicação das condições de nitretação para a obtenção da camada de nitretada com espessura maior que 6,0 μm , com fase γ' , em escala industrial obteve sucesso técnico, como constatado pelos resultados de espessura de camada desejada ao longo de toda a carga de peças, bem como o baixo gradiente térmico ao longo do novo suporte, que permitiu aumentar a capacidade de carga do equipamento.

- A avaliação econômica permitiu visualizar que além de todos os benefícios técnicos de aumento da confiabilidade tribológica, a nova especificação propicia um resultado econômico positivo com grande potencial de redução de custos.

10 SÍNTESE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Este trabalho consistiu em desenvolver uma nova especificação de camada nitretada para bielas sinterizadas de compressores herméticos. E esta nova especificação de camada deveria atender os seguintes objetivos específicos:

- A nova camada nitretada deve aumentar a confiabilidade do par tribológico BIELA versus PINO-DO-PISTÃO.
- A nova camada nitretada deve possuir uma topografia mais refinada possibilitando a eliminação da etapa de escovação dos olhais das bielas após a nitretação.
- As condições do processo de nitretação escolhidas devem permitir aumentar a produtividade (capacidade de carga do reator) do equipamento.
- As condições do processo de nitretação escolhidas devem permitir otimizar e/ou eliminar etapas de limpeza das bielas antes da nitretação.
- Avaliação econômica das soluções desenvolvidas deveria apontar para reduções de custo final das peças nitretadas.

O desenvolvimento seguiu três fases, iniciando com a fase em escala Laboratorial, seguida de uma fase em escala Piloto e finalizando com uma fase em escala Industrial. Cada fase se baseou nos resultados positivos da fase antecessora.

Seguindo este plano de desenvolvimento os resultados e conclusões, são sintetizados a seguir.

10.1 RESULTADOS E CONCLUSÕES: FASE LABORATORIAL.

Após a realização desta etapa foi possível definir as condições preliminares de nitretação para os olhais do compressor, atendendo as especificações desejadas, com os resultados do Ciclo 9.

Especificação:

Camada branca monofásica γ' (Fe₄N), com espessura homogênea $\geq 6 \mu\text{m}$.

Parâmetros de nitretação que atenderam à especificação.

- Tensão de saída: 500 V
- Pressão: 266 Pa (2,0 Torr)
- Temperatura de Patamar: 540 ° C
- Mistura Gasosa: (30% N₂ + 70%H₂)

Ainda nesta fase se realizou um estudo para caracterizar a influência sobre a resistência ao desgaste de desvios de qualidade típicos, e muito recorrentes em fornecedores comerciais, da nitretação por plasma. Ou seja, camadas com desvios microestruturais devido ao excesso de temperatura causados pelo efeito de cátodo oco, que levam ao crescimento colunar da camada ou precipitação da fase Braunita. Após a obtenção das amostras, ensaios de caracterização e testes em tribômetro, os resultados obtidos, permitiram concluir:

- A taxa de desgaste é significativamente aumentada pela presença de braunita (2,1x) e crescimento colunar (2,4x) em comparação com a camada sem defeitos.
- Estrutura colunar atua como concentradora de tensão em uma região crítica, abaixo do contato tribológico, acelerando a nucleação e propagação de trincas que se interligam e levam ao desprendimento da camada de nitreto em forma de pequenas partículas durante o contato deslizante;
- A natureza dura e quebradiça das camadas de braunita induz a nucleação e propagação de trincas nas camadas de nitreto durante o contato deslizante. A propagação desses defeitos acaba ocasionando a remoção de flocos, principalmente ao redor da porosidade, resultando em menor resistência ao desgaste;
- O coeficiente de atrito não foi influenciado pela presença dessas características microestruturais, uma vez que a diferença não foi estatisticamente significativa com todas as médias permanecendo em torno 0,4.
- A camada Livre-de-Defeitos, que representa a nossa nova especificação (γ'), apresentou uma resistência ao desgaste 210% a 240% maior, e o mecanismo de desgaste no contato é de polimento suave.

Estes resultados demonstram, de maneira categórica, os riscos de se aceitar componentes reais com estes desvios de qualidade.

10.2 RESULTADOS E CONCLUSÕES: FASE DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO

Utilizando-se os aprendizados da Fase Laboratorial, com a definição das condições de nitretação adequada para a obtenção da camada fase γ' , com espessura $\geq 6,0 \mu\text{m}$, e sem defeitos microestruturais, partiu-se para a nitretação de peças em escala piloto.

Os resultados obtidos permitem constatar que a aplicação dos parâmetros de nitretação desenvolvidos na escala laboratorial alcançou êxito na escala piloto, com a obtenção das espessuras, fases de nitretos e ausência de defeitos como desejado e em todas as peças (50 por carga).

Também se realizou um ranqueamento de desempenho tribológico em tribômetro entre 11 configurações diferentes de camada nitretada comparando-se os resultados deste desenvolvimento com componentes nitretados por fornecedores comerciais e as condições com desvios de qualidade (defeitos).

Estas 11 configurações separadas em 3 grupos, permitiram concluir que o grupo da nova especificação (Fase γ') é mais homogêneo quando comparado ao grupo da especificação atual (Fase ϵ), além de apresentar em uma média geral menor taxa de desgaste. O grupo da especificação atual apresenta resultados médios tendendo a equivaler aos resultados do grupo com defeitos.

Assim o ranqueamento tribológico em testes de tribômetro demonstram que a nova especificação apresenta resultados médios, da taxa de desgaste, menores que a especificação atual.

Encerrando a fase de desenvolvimento do Produto, 8 configurações de montagem do par biela-pino do pistão foram montadas em compressores e submetidos à testes de confiabilidade na condição de Desgaste 500h.

Considerando os resultados dos testes de desgaste de 500 h conclui-se que a nova especificação para a camada nitretada com a Fase γ' é viável e esta APROVADA.

Além disso, ela permite variações para a configuração final do par Biela – Pino do Pistão que permitem aumentar as possibilidades de redução de custos do conjunto.

A três variações aprovadas são:

1. Configuração G: nitreto fase γ' sem escovação e sem fosfato + oxidação, + pino do pistão somente temperado.

- Maior rentabilidade: eliminação da escovação, da fosfatização e substituição de um pino do pistão nitretado por um pino somente temperado.

- A rugosidade do pino temperado testado é maior que no nitretado. Mesmo assim os resultados foram aceitáveis.
- Melhores resultados tribológicos.

2. Configuração B: nitreto fase γ' , sem escovação e sem fosfato + pino nitretado.

- Média rentabilidade: eliminação da escovação, da fosfatização, mas mantém o pino do pistão nitretado.
- Resultados tribológicos limítrofes para esta opção com alguns valores dimensionais ligeiramente acima do especificado. Porém os resultados são aceitáveis.

3. Configuração D: nitreto fase γ' , sem escovação, com fosfato + pino nitretado.

- Menor rentabilidade: elimina-se somente a escovação, mantendo a fosfatização e o pino do pistão nitretado.
- Resultados tribológicos e limítrofes para esta opção com alguns valores dimensionais ligeiramente acima do especificado. Porém os resultados são aceitáveis.

10.3 RESULTADOS E CONCLUSÕES FASE DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO.

Com a aprovação das condições de nitretação com fase γ' e suas variações nos testes em Produto, resta comprovar que é possível os mesmos resultados para a especificação da camada em uma escala Industrial.

Nesta fase testou-se um novo suporte de nitretação aumentando a quantidade de peças no reator de 50 para 7.000 olhais. Nesta escala os parâmetros de nitretação e o projeto do suporte devem garantir uma formação homogênea de plasma em todas as peças e a inexistência de gradientes térmicos maiores que 25° C entre as peças ao longo de toda a carga, para garantir a especificação de camada em todas as peças e a repetibilidade e entre diferentes lotes de fabricação.

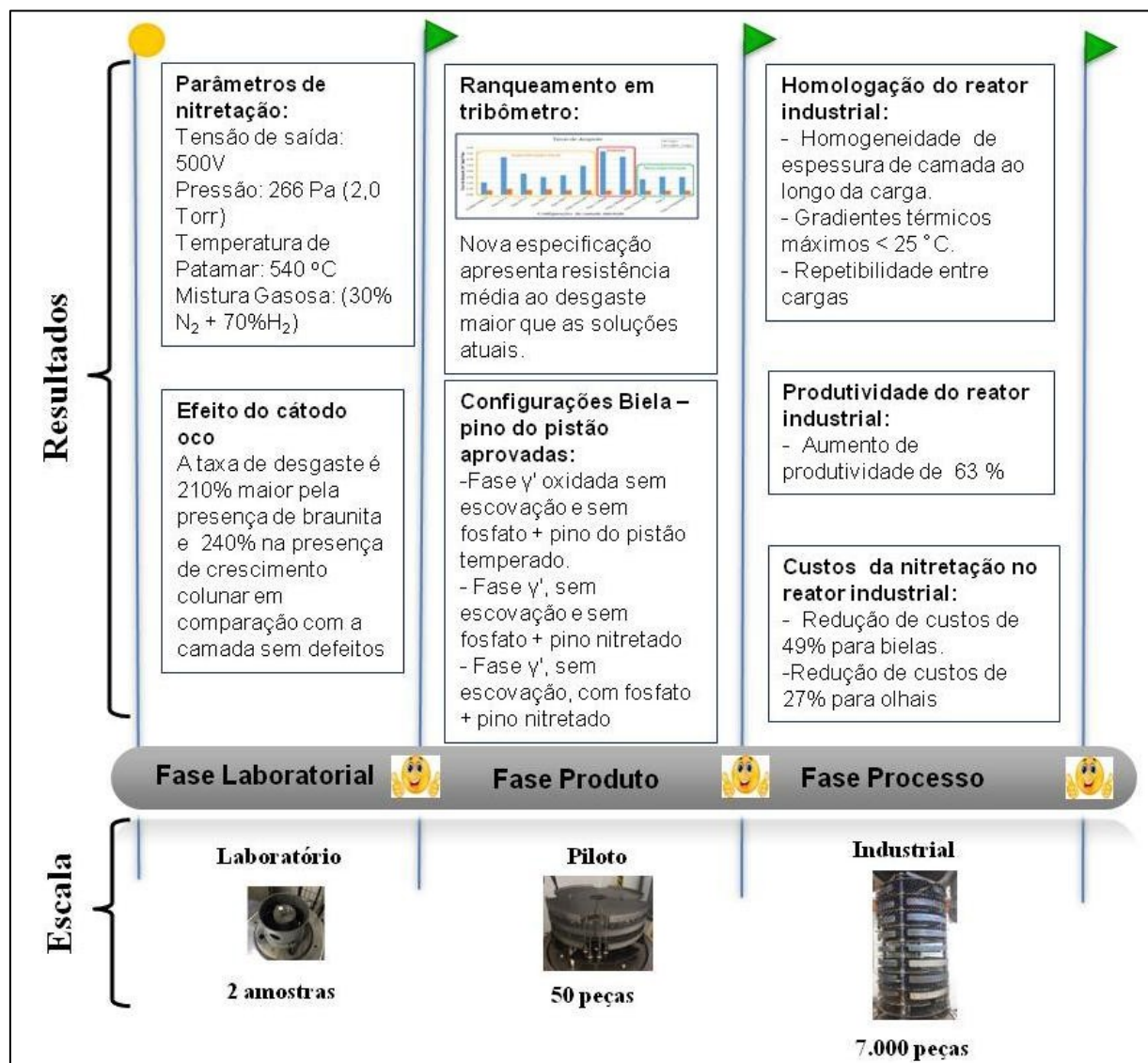
Também se realizou uma avaliação econômica da nova especificação com o novo suporte de peças para verificar o impacto geral nos custos da nitretação. Os resultados permitiram concluir:

- A aplicação das condições de nitretação para a obtenção da camada de nitretos com espessura maior que $6,0 \mu\text{m}$, com fase γ' , em escala industrial obteve sucesso técnico, constatado pelos resultados de espessura de camada desejada ao longo de toda a carga de peças, bem como o baixo gradiente térmico ao longo do novo suporte, que permitiu aumentar a capacidade de carga do equipamento.

- A avaliação econômica permitiu validar que além de todos os benefícios técnicos de aumento da confiabilidade tribológica, a nova especificação propicia um resultado econômico positivo com significativo potencial de redução de custos.

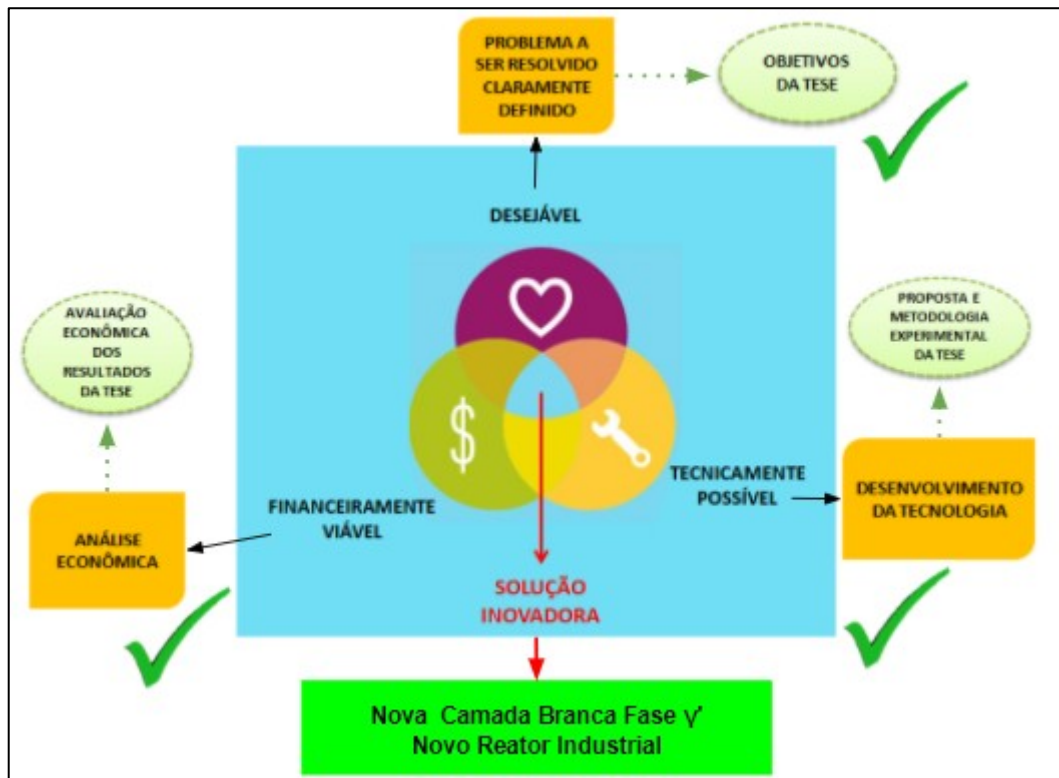
A figura 10.1 sintetiza os resultados obtidos nas 3 fases de desenvolvimento da nova especificação para camada nitretada em bielas e olhais.

Figura 10.1 Síntese dos resultados da tese.



E finalizando, a figura 10.2 representa o cumprimento das etapas do Processo de Inovação, proposta no capítulo 2.

Figura 10.2 – Cumprimento das etapas do Processos de Inovação.



Fonte: autoria própria

11 PRODUÇÃO CIENTÍFICA RELACIONADA À TESE.

11.1 PATENTES CONCEDIDAS.

BINDER R; BINDER, C. ; BENARDELLI, E. A. ; HAMMES, G. ; LAMIM, T. S. ; KLEIN, A. N. . Plasma process and reactor for the thermochemical treatment of the surface of metallic pieces. 2015, Japão.

Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: JP2017534000, título: "Plasma process and reactor for the thermochemical treatment of the surface of metallic pieces" , Instituição de registro: Japanese Patent Office. Depósito: 19/10/2015

BINDER R; BINDER, C. ; BENARDELLI, E. A. ; HAMMES, G. ; LAMIM, T. S. ; KLEIN, A. N. . Plasma process and reactor for the thermochemical treatment of the surface of metallic pieces. 2015, Estados Unidos.

Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: US2018023185, título: "Plasma process and reactor for the thermochemical treatment of the surface of metallic pieces" , Instituição de registro: United States Patent and Trademark Office. Depósito: 19/10/2015

BINDER R; BINDER, C. ; BENARDELLI, E. A. ; HAMMES, G. ; LAMIM, T. S. ; KLEIN, A. N, Plasma process and reactor for the thermochemical treatment of the surface of metallic pieces. 2015, China..

Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: CN107002228, título: "Plasma process and reactor for the thermochemical treatment of the surface of metallic pieces" , Instituição de registro: state intellectual property office of the p.r.c.. Depósito: 19/10/2015; Concessão: 13/12/2019.

11.2 ARTIGOS PUBLICADOS.

SALVARO, D.B.; GIACOMELLI, R. O. ; BINDER, R.; BINDER, C.; KLEIN, A. N.; DE MELLO, J.D.B. Assessment of a multifuncional tribological coating (nitride+DLC) deposited on grey cast iron in a mixed lubrication regime. WEAR **JCR**, v. 376-377, p. 803-812, 2017.

BINDER, R.; LAMIM; T.S.; SALVARO; D.B.; GIACOMELLI; R.O.; KLEIN; A.N.; DE MELLO, J.D.B. Plasma nitrided compound layers in sintered parts: microstructures and wear mechanisms, WEAR.

11.3 CAPÍTULO EM LIVRO.

BINDER, R.; LAMIM; T.S.; SALVARO; D.B.; GIACOMELLI; R.O.; BINDER, C.; KLEIN; A.N.; DE MELLO, J.D.B. The Effect of Using Hollow Cathode on the Tribological Behavior of Plasma Nitrided Layers.. Mechanisms and Machine Science. 1ed.: Springer International Publishing, 2019, v. , p. 3893-3902.

12 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A decisão de implantar o novo processo, usando as novas condições de nitretação e novo projeto do reator de nitretação envolve uma série de estudos e elaboração dos possíveis cenários, considerando aspectos de logística, distribuição, fornecedores, retorno de investimento, controle de qualidade, entre outros.

Caso a empresa decida pela verticalização da nova solução de nitretação por plasma para as bielas e olhais as seguintes atividades deverão ser realizadas.

1 – Projeto e construção do reator de nitretação com capacidade em torno de 12.000 olhais ou 5.500 bielas.

2 – Homologação do novo equipamento quanto a homogeneidade de resultados e repetibilidade entre cargas.

3 – Realizar testes de confiabilidade em compressores com as peças do novo equipamento.

13 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A.F.O. SKONIESKI, E. L. (2008). Influência da mistura gasosa em processos de nitretação e nitrocarbonetação a plasma. *Revista Brasileira de Aplicações à. Vácuo*, V27 , 175–182.

Adilson Luiz Manke. (2011). *Manual de treinamento Embraco: Mechanism_and_Lubrication*. Joinville.

BINDER, C. (2006). *Dissertação de mestrado: Avaliação do desempenho de componente de ferro puro sinterizado nitretado por plasma em reator de escala industrial*. Florianópolis: UFSC.

C. ALVES, J. A. (2007). Effect of cooling rate on properties of plasma nitrided AISI 1010 steel. *Surface Coatings Technology* 201 , 7566–7573.

C. BINDER, T. B. (2015). Effect of nature of nitride phases on sliding wear of plasma nitrided sintered iron. *Wear* 332-333 , pp. 995–1005.

CHAPMAN, B. N. (1980). *Glow discharge processes*. John Wiley & Sons.

CHIAVERINI, V. (1984). *Aços e Ferros Fundidos*, 5a edição.

DIETER, G. E. (1988). *Mechanical Metallurgy*. McGraw Hill Book Company.

Echos, E. D. (s.d.). <https://materiais.escoladesignthinking.echos.cc/ebook-business-design>. Fonte: <https://escoladesignthinking.echos.cc/>.

EDENHOFER, B. (1974). Physical and Metallurgical Aspects of Ionitriding. *Heat Treatment of Metals* .

ESPÍNDOLA, R. D. (2017). *Dissertação de mestrado: Análise teórico-experimental do desempenho de refrigeradores domésticos com condensadores do tipo Hot-Wall*. Florianópolis: UFSC.

FONTES, M. e. (2014). Characterization of plasma nitrided layers produced on sintered iron. *Journal of Materials Research and Technology* , 210-216.

FROELICH, A. R. (2003). *Tese de Doutorado: Estudo do tratamento superficial DUPLEX com TiN e CrN de aços ferramenta para trabalho a quente da classe H13 para matrizes de injeção de ligas de alumínio*. . Porto Alegre: UFRGS.

GONÇALVES, J. M. (2004). *DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UMA METODOLOGIA PARA A ANÁLISE TÉRMICA DE REFRIGERADORES DOMÉSTICOS*. Florianópolis .

H. KOVACI, A. Y. (2016). Fatigue crack growth analysis of plasma nitrided AISI 4140 low-alloy steel: Part 2-Variable amplitude loading and load interactions. *Materials Science and Engineering: A, Volume 672* , 265-275.

HANSEN, M. (1958). *Metallurgy and metallurgical engineering series;*, p.671. McGraw Hill Book Company.

HEUMANN, T. H. (1989). *Diffusion in Mettallen: Grundlagen, Theorie, Theorie, Vorgänge in Reinmetallen und Legierungen 2 ed.* Springer: Verlag.

JACK, D., & JACK, K. (1973). “Carbides and Nitrides in Steel. . *Materials Science and Engineering v 11* , pp. 1-27.

JACK, D., & LIGHTFOOT, B. (1973). Kinetics of nitriding with and without white layer formation p.59-65. *Heat Treatment, The Metals Society, London* .

JONES, C. K., MARTIN, S. W., STRUGES, D. J., & HUDIS, M. (1975). *Ion Nitriding, heat treatment p 71-79.* London: The Metal Society.

K.S. FANCEY, A. L. (1995). The influence of process gas characteristics on the properties of plasma nitrided steel. *Surf. Coatings Technol.* 76–77 , 694–699.

KASOUF, C., APELIAN, D., & GUMMESON, U. (2002). Opportunities and Challenges of P/M: Retrospective and Prospective Views of the Industry. *The International Journal of Powder Metallurgy, Princeton, NJ* , pp. v.38, n 4, p 72-81.

KLEIN, A. N. (2002). *Metalurgia do pó e materiais sinterizados. Material didático em sala de aula.* Florianópolis : UFSC.

LAMIM, T. (2016). Cementação e nitretação-cementação a plasma em baixa temperatura em ferro puro sinterizado. *Dissertação de Mestrado: Universidade Federal de Santa Catarina* .

LENEL, F. V. (1980). *Powder Metallurgy: Princples and Applications.* p. 589. Princeton, New Jersey: Metal Powder Industries Federation.

LIGHTFOOT, B. J., & JACK, D. H. (1973). Kinetics of nitriding with and without White-layer formation. *The Metals Society* , 248-254.

MACAGNAN, M. H. (2018). www.professor.unisinos.br/mhmac/Refrigeração/index.htm. Fonte: APOSTILA DISCIPLINA REFRIGERAÇÃO.

MANKE, A. L. (2011). *Manual de treinamento Embraco: Mechanism_and_Lubrication.* Joinville.

Mauricio Viana, e. a. (2014). *Desing Thinking, inovação em negócios.* Rio de Janeiro: MJV Press.

METALS HANDBOOK. (1973). *Metallography, Structure and Phase Diagrams 8ed*, p 303, 360,411 e 412. ASM International.

METALS HANDBOOK, ASTM: Powder Metallurgy, v7, 9 edition. (1984).

MJV Team. (13 de 02 de 2020). <https://www.mjvinnovation.com/pt-br/blog/o-que-e-inovacao-e-como-ela-pode-beneficiar-sua-empresa/>.

Mohanbir Sawhney, R. C. (2006). The 12 Different Ways for Companies to Innovate. *MIT Sloan Management Review Vol. 47, No. 3* , 74-81.

NEULAENDER, PAULO. (27 de 11 de 2017). <http://refrigeracaoomarechal.com.br>. Acesso em 2018, disponível em Refrigeracao Marechal.

OLIVEIRA, W. (s.d.). (<https://evolvemp.com/o-que-e-inovacao/>).

PIMENTEL, V. J. (2007). NITRETAÇÃO EM PEÇAS APRESENTANDO FUIROS CILÍNDRICOS EM FORNO INDUSTRIAL A PLASMA. *DISSERTAÇÃO DE MESTRADO : Universidade Federal do Paraná* .

R. GRÜN, H. G. (1991). Plasma nitriding in industry-problems, new solutions and limits. *Mater. Sci. Eng. A. 140* , 435–441.

R.S. MASON, M. P. (1994). Sputtering in a glow discharge ion source-pressure dependence: theory and experiment. *Journal of Physics D: Applied Physics, Volume 27, Number 11* , 2363–2371.

R.S. PESSOA, J. S. (2018). Experimental Studies on Low-Pressure Plane-Parallel Hollow Cathode Discharges. *Brazilian Journal Phys.* , 411–420.

ROCHA, A. S. (2003). Effect of different surfaces states before plasma nitriding on properties and machining behaviour of M2 high-speed steel. *Surface and Coatings Technology, volume 165, cap. 2* , pp. 176-185.

ROCHA, A. S. (2000). *Tese Doutorado: Influência do Estado Superficial Prévio na Nitretação a Plasma do Aço AISI M2*, . Porto Alegre: UFRGS.

Shioga, P. H. (2013). *Dissertação de mestrado: EFEITO DE CONDIÇÕES DE NITRETAÇÃO A PLASMA NA TOPOGRAFIA DE SUPERFÍCIE E NA ADESIVIDADE DE REVESTIMENTO DLC EM AÇO CARBONO*. Florianópolis: UFSC.

T. LAMPE, S. E. (1993). Compound layer formation during plasma nitriding and plasma nitrocarburising. *Surface Engineering 9* , 69–76.

THIAGO DE SOUZA LAMIM, D. R. (2019). The Effect of Using Hollow Cathode on the Tribological Behavior of Plasma Nitrided Layers. 3893-390.

THIESEN, M. (2009). *Manual de Treinamento Embraco: Aplicações de Refrigeração*.

THUMMLER, F., & OBERACKER, R. (1993). *An Introduction to Powder Metallurgy*. The Institute of Materials.

V.I. KOLOBOV, L. T. (1995). Analytic model of the hollow cathode effect. *Plasma Sources Sci. Technol.* 4 , 551–560. .

WÖHRLE, T. (2012). *Thermodynamics and kinetics of phase transformations in the Fe-N-C system*. Stuttgart: Fakultät Chemie der Universität Stuttgart, 2012.