

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

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E HOMOLOGAÇÃO DE UM REATOR
INDUSTRIAL PARA EXTRAÇÃO DE LIGANTES E SINTERIZAÇÃO
ASSISTIDOS POR PLASMA (PADS) DE PEÇAS INJETADAS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS,
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

RICARDO MACHADO

Orientador: Aloísio Nelmo Klein, Dr. Ing

Co-orientador: Paulo Antônio Pereira Wendhausen, Dr. Ing.

FLORIANOPOLIS, SETEMBRO DE 2007

PROJETO, CONSTRUÇÃO E HOMOLOGAÇÃO DE UM REATOR INDUSTRIAL PARA
EXTRAÇÃO DE LIGANTES E SINTERIZAÇÃO ASSISTIDOS POR PLASMA (PADS) DE
PEÇAS INJETADAS

RICARDO MACHADO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE *MESTRE EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS* APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Prof. Aloísio Nelmo Klein, Dr. Ing.
UFSC - Depto. de Engenharia Mecânica
ORIENTADOR

Prof. Paulo Antonio Pereira Wendhausen, Dr. Ing.
UFSC - Depto. de Engenharia Mecânica
CO-ORIENTADOR

Prof^a. Ana Maria Maliska, Dr. Eng.
UFSC - Depto. de Engenharia Mecânica
COORDENADORA DO PGMAT

Banca Examinadora

Prof. Guilherme Mariz de Oliveira Barra, Dr. Eng.
UFSC - Depto. de Engenharia Mecânica
PRESIDENTE

Prof. Nelson Back, Ph. D.
UFSC – Depto. de Engenharia Mecânica
MEMBRO

Prof. Antonio Rogério de Souza, Dr. D'Etat.
UFSC - Depto. de Engenharia Mecânica
MEMBRO

Prof. Davi Fusão, Dr. Eng.
CEFET PR - Depto. de Engenharia Mecânica
MEMBRO

Dedico este trabalho a Deus

A minha esposa Karin

A meus pais Ironi e Beatriz

AGRADECIMENTOS

A DEUS, por tudo o que somos e por tudo o que há.

Ao Prof. Aloísio Nelmo Klein, por todos estes anos de aprendizado, apoio, confiança e amizade irrestritos.

Ao Prof. Paulo Antonio Pereira Wendhausen, pela confiança, amizade e ensinamentos em diversas situações.

Ao Prof. Joel René Louis Muzart (*in memorian*) pela colaboração, amizade e contribuição imensurável.

Ao Prof. Davi Fusão, por todos os momentos de trabalho, ensinamentos e amizade.

A empresa Lupatech S/A (Steelinject Injeção de Aços Ltda.), em nome dos Srs. Nestor Perini e Gilberto Pasquali.

Ao Waldyr Ristow, pela confiança, acolhida em Caxias e acima de tudo, pela grande amizade.

Ao Paulo Roberto Alba, pelo conhecimento e colaboração no trabalho realizado.

Aos amigos do LabMat no tempo de faculdade e mestrado: Jairo Escobar, Cristiano Binder e Rodrigo Perito, entre outros.

As pessoas que ajudaram o reator PADS tornar-se existente: Eduardo Ludvich, Marco Aurélio Remor, André Slavieiro, Prof. Ricardo Oliveira, entre outros.

A todos os amigos da Steel (os que estão e os que já não estão mais): Eduardo, Wilmar, Bridi, Vander, Newton, Vinicius, Sergio, Leopoldo e Matheus.

A minha esposa Karin, pelo incentivo, dedicação e amor em todos os momentos (desde a época de faculdade até hoje).

Aos meus pais, Ironi e Beatriz, por quem sou, pelo amor e dedicação em todos estes anos.

A meu irmão, Rodrigo, pelo companheirismo no tempo de faculdade e por sua amizade.

A Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Ao Departamento de Engenharia Mecânica (EMC).

A Universidade de Caxias do Sul (UCS).

A FINEP, pelo financiamento dos projetos relacionados à tecnologia do plasma.

A todos que de alguma forma ajudaram esta etapa de minha vida tornar-se realidade.

Sumário

| | |
|--|------|
| Lista de figuras | IV |
| Lista de tabelas | VII |
| Lista de símbolos | VIII |
| | |
| Resumo..... | X |
| <i>Abstract</i> | XI |
| | |
| 1. Introdução | 1 |
| 1.1 Contextualização do projeto..... | 1 |
| 1.2 Objetivos do trabalho..... | 2 |
| 1.3 Estrutura da dissertação..... | 3 |
| | |
| 2. Moldagem de pós por injeção | 4 |
| 2.1 Pós e ligantes..... | 6 |
| 2.2 Obtenção do <i>feedstock</i> | 7 |
| 2.3 Injeção..... | 8 |
| 2.4 Extração de ligantes..... | 10 |
| 2.5 Sinterização..... | 12 |
| 2.6 Operações secundárias..... | 14 |
| | |
| 3. Tecnologia de plasma aplicada ao processamento de materiais .. | 16 |
| 3.1 Descargas de plasma em baixa pressão..... | 16 |
| 3.1.1 Conceitos de física de plasmas..... | 16 |
| 3.1.2 Processos de colisão em descargas de plasma..... | 19 |
| 3.1.3 Plasma pouco ionizado..... | 21 |
| 3.2 Processamento de materiais por plasma..... | 23 |
| 3.2.1 Extração de ligantes e sinterização assistidos por plasma..... | 23 |
| 3.2.2 Tratamentos termoquímicos por plasma..... | 25 |

| | | |
|------------|---|----|
| 4. | Metodologia de desenvolvimento do reator | 26 |
| 4.1 | Ferramentas de metodologia de projeto | 26 |
| 4.1.1 | Projeto informacional..... | 27 |
| 4.1.2 | Projeto conceitual..... | 27 |
| 4.1.3 | Projeto preliminar..... | 28 |
| 4.1.4 | Projeto detalhado..... | 28 |
| 4.2 | Componentes utilizados e ciclos de processamento | 29 |
| 4.2.1 | Componentes utilizados..... | 29 |
| 4.2.2 | Ciclos de processamento..... | 30 |
| 4.3 | Caracterização dos componentes | 30 |
| 4.3.1 | Caracterização dimensional..... | 30 |
| 4.3.2 | Caracterização físico-mecânica..... | 31 |
| 5. | Projeto informacional do reator | 33 |
| 5.1 | Reator em escala piloto | 33 |
| 5.2 | Casa da qualidade para o PADS | 34 |
| 5.3 | Especificações de projeto para o PADS | 38 |
| 6. | Projeto conceitual do reator | 45 |
| 6.1 | Estrutura funcional do PADS | 45 |
| 6.2 | Descrição da análise funcional | 46 |
| 6.3 | Obtenção da matriz morfológica do PADS | 48 |
| 6.4 | Design da concepção definida para o reator PADS | 57 |
| 7. | Projeto preliminar do reator | 61 |
| 7.1 | Sistema estrutural | 61 |
| 7.2 | Sistema de aquecimento | 64 |
| 7.3 | Sistema de descarga de plasma | 72 |
| 7.4 | Sistema de vácuo | 75 |
| 7.5 | Sistema de gases | 78 |
| 7.6 | Sistema de resfriamento | 79 |
| 7.7 | Sistema de movimentação | 81 |
| 7.8 | Sistema de aquisição, monitoramento e controle de processo | 82 |
| 7.9 | Leiaute preliminar do reator PADS | 85 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| 8. | Projeto detalhado do reator | 90 |
| 8.1 | Programação dos ciclos | 90 |
| 8.2 | Manual de operação do reator PADS | 93 |
| 8.3 | Manual de operação do reator PADS | 96 |
| 9. | Construção e testes do reator | 101 |
| 9.1 | Montagem da estrutura mecânica e mufla térmica | 101 |
| 9.2 | Montagem do sistema elétrico/eletrônico | 107 |
| 9.3 | Interface homem-máquina (IHM) | 109 |
| 9.4 | Testes de vácuo e vazamento | 109 |
| 9.5 | Testes preliminares de aquecimento e descarga de plasma | 111 |
| 10. | Homologação do reator | 114 |
| 10.1 | Testes com aços ao carbono | 114 |
| 10.2 | Testes com aços inoxidáveis | 123 |
| 11. | Discussão geral e síntese dos resultados | 134 |

| | | |
|--|---------------------------------|-----|
| | Referências Bibliográficas..... | 137 |
|--|---------------------------------|-----|

| | | |
|--|-------------|-----|
| | Anexos..... | 139 |
|--|-------------|-----|

Anexo 1. Cálculo da transferência de calor para a mufla térmica do reator PADS.

Anexo 2. Cálculo da perda de carga devido à tubulação existente entre o reator PADS e as bombas de vácuo.

Anexo 3. Cálculo da vazão de água necessária para a refrigeração da câmara hermética do reator PADS.

Anexo 4. Dimensionamento dos trocadores de calor e seleção do ventilador centrífugo para o resfriamento forçado do reator PADS.

Anexo 5. Telas de visualização de parâmetros da interface homem-máquina (IHM) do reator PADS.

Anexo 6. Vistas isométricas do reator PADS.

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Volume de produção x complexidade geométrica para alguns processos de fabricação metal-mecânicos..... | 5 |
| Figura 2. Início do processo de sinterização, com a formação de contatos de sinterização entre partículas de pó..... | 13 |
| Figura 3. Descarga luminescente de plasma..... | 18 |
| Figura 4. Descarga de plasma em regime anormal, gerada entre dois eletrodos..... | 22 |
| Figura 5. Processo de extração de ligantes em um reator contendo uma descarga de plasma..... | 24 |
| Figura 6. Casa da qualidade para o reator PADS..... | 39 |
| Figura 7. Estrutura funcional do reator PADS..... | 47 |
| Figura 8. Matriz morfológica do reator PADS..... | 51 |
| Figura 9. Vista do reator PADS..... | 59 |
| Figura 10. Vista em corte do reator PADS..... | 60 |
| Figura 11. Estrutura mecânica da câmara do reator PADS..... | 60 |
| Figura 12. Sistema de resfriamento do reator PADS..... | 61 |
| Figura 13. Mufla térmica do reator PADS..... | 61 |
| Figura 14. Eletrodos para a descarga de plasma do reator PADS..... | 62 |
| Figura 15. Geometria da estrutura do reator PADS..... | 65 |
| Figura 16. Volume de controle para a análise térmica do reator PADS..... | 68 |
| Figura 17. Gráfico da redução de temperatura do reator PADS com a utilização da mufla térmica e camisa d'água..... | 68 |
| Figura 18. Esquema radial do sistema térmico do reator..... | 70 |
| Figura 19. Esquema da mufla térmica do reator PADS..... | 70 |
| Figura 20. Diagrama elétrico do sistema resistivo do forno PADS..... | 72 |
| Figura 21. Estrutura de eletrodos do reator PADS..... | 75 |
| Figura 22. Curva de pressão para o conjunto de bombas do reator PADS..... | 79 |
| Figura 23. Esquema do circuito fechado de refrigeração do reator PADS..... | 82 |
| Figura 24. Diagrama de redes de sinais do reator PADS..... | 86 |
| Figura 25. Esquema da mufla térmica do reator PADS (frontal)..... | 87 |
| Figura 26. Esquema da mufla térmica do reator PADS (superior)..... | 88 |

| | |
|---|-----|
| Figura 27. Sistema de eletrodos do reator PADS..... | 89 |
| Figura 28. Distribuição do gás do reator PADS..... | 90 |
| Figura 29. Câmara do reator PADS..... | 91 |
| Figura 30. Tela de programação do controlador de processo do reator PADS..... | 93 |
| Figura 31. Cronograma do reator PADS..... | 102 |
| Figura 32. Montagem das câmaras do reator com o eleva-car..... | 106 |
| Figura 33. Montagem do sistema de vácuo e trocadores de calor..... | 106 |
| Figura 34. Parte interna da câmara superior – estrutura de fixação da mufla térmica..... | 107 |
| Figura 35. Panela de fixação dos eletrodos e blindagem térmica inferior..... | 107 |
| Figura 36. Mufla térmica do reator PADS..... | 107 |
| Figura 37. Ventilador para resfriamento forçado e painel de controle..... | 107 |
| Figura 38. Estrutura para disposição dos transformadores elétricos..... | 107 |
| Figura 39. Mufla térmica – resistores elétricos e sua fixação..... | 107 |
| Figura 40. Eletrodos e blindagem térmica inferior..... | 108 |
| Figura 41. Reator PADS aberto, com a fonte de plasma ao lado (esquerdo)..... | 108 |
| Figura 42. Reator PADS..... | 108 |
| Figura 43. Reator PADS fechado, com a fonte de plasma ao lado (esquerdo)..... | 108 |
| Figura 44. Resultados de vácuo final e vazamento do reator PADS..... | 111 |
| Figura 45. Reator PADS com descarga de plasma na faixa de temperatura de 600 °C..... | 114 |
| Figura 46. Reator PADS com descarga de plasma na faixa de temperatura de 950 °C..... | 114 |
| Figura 47. Reator PADS na temperatura de 1350 °C..... | 114 |
| Figura 48. Temperaturas das diferentes zonas de aquecimento para <i>set point</i> de 1350 °C..... | 114 |
| Figura 49. Perfil do gráfico de processamento da liga Fe ₂ Ni _{0,6} C via PADS..... | 116 |
| Figura 50. Micrografia do aço Fe ₂ Ni _{0,6} C produzido no reator PADS..... | 119 |
| Figura 51. Peças processadas em aço ao carbono no reator PADS..... | 120 |
| Figura 52. Foto do componente processado na liga Fe ₂ Ni _{0,6} C e cotas..... | 120 |
| Figura 53. Gráfico da dispersão dimensional avaliada para os ciclos de processamento para a liga Fe ₂ Ni _{0,6} C (40 peças por lote)..... | 123 |
| Figura 54. Fotografia das peças em Fe ₂ Ni _{0,6} C após o processamento via reator PADS..... | 124 |
| Figura 55. Perfil do gráfico de processamento da liga AISI 316-L via PADS..... | 125 |

| | |
|--|-----|
| Figura 56. Descarga de plasma na temperatura de 125 °C..... | 127 |
| Figura 57. Descarga de plasma na temperatura de 290 °C..... | 127 |
| Figura 58. Descarga de plasma na temperatura de 335 °C..... | 127 |
| Figura 59. Descarga de plasma na temperatura de 380 °C..... | 127 |
| Figura 60. Descarga de plasma na temperatura de 395 °C..... | 127 |
| Figura 61. Descarga de plasma na temperatura de 610 °C..... | 127 |
| Figura 62. Microestrutura do aço inoxidável AISI 316-L processado pelo PADS..... | 129 |
| Figura 63. Peças processadas em aço inoxidável no reator PADS..... | 130 |
| Figura 64. Foto do componente processado na liga AISI 316-L e cotas..... | 130 |
| Figura 65. Gráfico da dispersão dimensional avaliada para os ciclos de processamento para a liga AISI 316-L (40 peças por lote)..... | 133 |
| Figura 66. Fotografia das peças em aço inoxidável após o processamento via reator PADS..... | 134 |

Lista de tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 1. Características de processamento dos componentes utilizados nos ciclos de homologação..... | 29 |
| Tabela 2. Parâmetros de processamento disponíveis no reator PADS..... | 30 |
| Tabela 3. Especificações de processo para o reator PADS..... | 39 |
| Tabela 4. Temperaturas das blindagens do reator PADS..... | 69 |
| Tabela 5. Dimensões definidas para a estrutura de eletrodos do reator PADS..... | 75 |
| Tabela 6. Valores dos parâmetros necessários para o dimensionamento do sistema de vácuo do reator PADS.... | 76 |
| Tabela 7. Sensores utilizados no reator PADS e suas características..... | 85 |
| Tabela 8. Lista de peças do reator PADS..... | 98 |
| Tabela 9. Parâmetros de processamento para a liga Fe ₂ Ni _{0,6} C via PADS..... | 116 |
| Tabela 10. Avaliação de densidade (método de Arquimedes) para os ciclos de processamento para a liga Fe ₂ Ni _{0,6} C (48 peças por lote)..... | 118 |
| Tabela 11. Teor de carbono para os ciclos de processamento para a liga Fe ₂ Ni _{0,6} C (48 peças por lote)..... | 118 |
| Tabela 12. Microdureza Vickers para os ciclos de processamento para a liga Fe ₂ Ni _{0,6} C (48 peças por lote).... | 119 |
| Tabela 13. Comportamento dimensional para os ciclos de processamento para a liga Fe ₂ Ni _{0,6} C (40 peças por lote)..... | 121 |
| Tabela 14. Variação percentual das dimensões avaliadas para os ciclos de processamento para a liga Fe ₂ Ni _{0,6} C (40 peças por lote)..... | 122 |
| Tabela 15. Gradiente de temperatura observado para os ciclos de processamento para a liga Fe ₂ Ni _{0,6} C..... | 123 |
| Tabela 16. Parâmetros de processamento para a liga AISI 316-L via PADS..... | 126 |
| Tabela 17. Avaliação de densidade (método de Arquimedes) para os ciclos de processamento para a liga AISI 316-L (48 peças por lote)..... | 128 |
| Tabela 18. Teor de carbono para os ciclos de processamento para a liga AISI 316-L (48 peças por lote)..... | 129 |
| Tabela 19. Microdureza Vickers para os ciclos de processamento para a liga AISI 316-L (48 peças por lote)... | 129 |
| Tabela 20. Comportamento dimensional para os ciclos de processamento para a liga AISI 316-L (40 peças por lote)..... | 131 |
| Tabela 21. Variação percentual das dimensões avaliadas para os ciclos de processamento para a liga AISI 316-L (40 peças por lote)..... | 132 |
| Tabela 22. Gradiente de temperatura encontrado para os ciclos de processamento para a liga AISI 316-L..... | 133 |

Lista de símbolos

PIM – Powder Injection Molding

PADS – Plasma Assisted Debinding and Sintering

MIM – Metal Injection Molding

CIM – Ceramic Injection Molding

PP - Polipropileno

PE - Polietileno

POM - Poliacetal

PS - Poliestireno

ΔG – Energia livre de Gibbs

HIP – Hot Isostatic Pressing

P_{atm} – Pressão Atmosférica

DC – Corrente contínua

RF – Radio frequência

HF – Alta frequência

PVD – Physical Vapour Deposition

CVD – Chemical Vapour Deposition

QFD – Quality Function Deployment

EVA – Etil-vinil-acetato

T_{on} – Tempo ligado

$T_{m\acute{a}x}$ – Temperatura máxima

T_{amb} – Temperatura ambiente

T_{sint} – Temperatura de sinterização

IHM –Interface homem máquina

CLP – Controlador lógico programável

TC's – Transdutores de corrente

PID – Proporcional, integral e derivativo

ATM - Atmosfera

AISI -

SAE – Society for Automotive Engineers

ABNT – Associação brasileira de normas técnicas

CH₄ - metano

I - corrente

I_{cte} – corrente constante

Resumo

Esta dissertação tem por objetivo apresentar de forma detalhada as etapas de projeto, construção e homologação de um reator híbrido plasma – resistores elétricos para o processamento de componentes mecânicos obtidos a partir da tecnologia de moldagem de pós metálicos por injeção (*MIM*) em escala industrial. O reator de extração de ligantes e sinterização em ciclo único (PADS) foi desenvolvido segundo o processo de plasma aplicado ao processamento de materiais metálicos, desenvolvido no Laboratório de Materiais (LabMat) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) desde 1997. A partir da utilização de uma metodologia de projeto, o equipamento foi projetado em quatro etapas na seguinte seqüência: projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado. Este enfoque proporcionou ao equipamento um caráter multidisciplinar onde, a partir de diversos ramos da engenharia, obteve-se um equipamento em escala industrial para a empresa Steelinject Ltda (uma empresa Lupatech S/A). A necessidade da utilização de processos mais produtivos e modernos, bem como corretos ambientalmente na indústria foram premissas na obtenção do equipamento. Neste trabalho é apresentado o projeto de engenharia, construção do equipamento e homologação do reator, a partir do processamento de duas ligas metálicas: aço ao carbono Fe₂Ni_{0,6}C e aço inoxidável AISI 316-L. Os resultados encontrados foram condizentes com o esperado para a tecnologia *MIM*, em relação ao desempenho físico-mecânico como dimensional dos produtos processados, de forma que o equipamento foi aprovado pela empresa Steelinject para operação em escala industrial. As patentes internacionais do processo e do equipamento foram depositadas, identificando o elevado grau de desenvolvimento tecnológico realizado em parceria entre o LabMat (UFSC) e a empresa Steelinject Ltda (uma empresa Lupatech S/A).

Abstract

This work presents in a detailed view the three steps of the hybrid plasma – electric heating PADS reactor: the design, construction and homologation. This reactor has been developed to process mechanical components by metal injection molding (MIM) technique on industrial scale. The debinding and sintering single cycle reactor (PADS) was developed from the plasma materials process technique developed by the Materials Laboratory (LabMat) of Federal University of Santa Catarina (UFSC) since 1997. Following a design methodology the equipment has been designed in four steps: informational design, concept design, preliminary design and detailed design. This way gave to the project a multidisciplinary feeling from different engineering areas. The industrial equipment was obtained to Steelinject Ltd (Lupatech S/A Company). The necessity of using more productive and modern process, as well as environmentally correct on the industry had been premises on the attainment of the equipment. This work presents the mechanical engineering project, construction and homologation of the reactor inside Steelinject Company, as well as routes to process two metallic alloys: carbon steel Fe₂Ni_{0,6}C and stainless steel AISI 316-L. The PADS results obtained were approved based on MIM technology references to physic-mechanical properties and dimensional accuracy to the processed products. The equipment was approved by Steelinject Company to the industrial operation. The international process and equipment patents were obtained showing the high level of technological development used between LabMat (UFSC) and Steelinject Ltd (Lupatech S/A Company).

1. Introdução

1.1 Contextualização do projeto

Os processos de extração de ligantes e sinterização assistidos por plasma vêm sendo desenvolvidos por uma equipe multidisciplinar de pesquisadores do Laboratório de Materiais (LabMat) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) desde 1997.

Nesta direção, inúmeras contribuições foram dadas por estes pesquisadores, referentes ao entendimento da influência da descarga de plasma sobre estas etapas, presentes na tecnologia da moldagem por injeção de pós (*Powder Injection Molding – PIM*) [1].

A utilização de uma descarga de plasma durante a degradação térmica de polímeros possibilita uma maior taxa de remoção dos mesmos, devido a utilização de espécies reativas (íons e elétrons secundários) [2]. O equipamento de sinterização por plasma favorece a formação de superfícies densas, bem como possibilita a deposição de filmes finos superficiais [1].

O interesse em poder utilizar em escala industrial de produção as vantagens de uma descarga de plasma fez a equipe de pesquisadores do LabMat, em parceria com a empresa Lupatech S/A (unidade de negócio Steelinject) iniciar o desenvolvimento de um processo e equipamento em escala industrial, para o processamento de componentes obtidos através da tecnologia *PIM*, a partir da utilização de descarga de plasma.

Desta forma, a empresa Lupatech S/A disponibilizou recursos para a construção de um equipamento industrial para a extração de ligantes e sinterização assistidos por plasma (*Plasma Assisted Debinding and Sintering – PADS*).

A possibilidade de realizar estas duas etapas de processamento em um mesmo equipamento (a partir de testes em escala piloto, no LabMat) [3] fez com que, em um mesmo ciclo térmico de aquecimento, estas etapas fossem realizadas, aumentando a produtividade do

processo *PIM*, em decorrência do menor tempo de processamento alocado e menores custos com consumo de energia elétrica e gases de processo.

A empresa Lupatech S/A, no sentido de desenvolver novas tecnologias associadas ao processo *PIM*, torna-se uma empresa diferenciada no cenário nacional, uma vez que a mesma, ao invés de utilizar tecnologias de outros países, desenvolve tecnologias próprias, de alto valor agregado, tornando-a referência em empresas de alta tecnologia.

1.2 Objetivos do trabalho

Com o presente trabalho, são propostas as seguintes etapas para a obtenção de um reator *PADS* em nível industrial:

1. Projeto do equipamento, a partir de ferramentas utilizadas na técnica de metodologia de projeto;
2. Construção do equipamento, na direção de uma documentação das etapas de fabricação, na forma de um ‘manual de fabricação’ para a empresa;
3. Homologação do equipamento, de forma a disponibilizar o mesmo ao setor produtivo da Steelinject Ltda.;
4. Obtenção de patentes em nível internacional do processo e equipamento *PADS*;

São objetivos específicos desta dissertação de mestrado:

- Criar uma nova rota de processamento em ciclo único para as etapas de extração de ligantes e sinterização no processo *PIM*;
- Disponibilizar uma rota alternativa de processamento para aços ao carbono e aços inoxidáveis a partir do processo *PIM*;
- Comparar as características dos componentes processados via processo *PADS* com as obtidas via processo tradicional da Steelinject, em termos de acuidade dimensional e propriedades físicas;
- Estabelecer uma parceria entre a Lupatech S/A e o LabMat, em termos de constante desenvolvimento do processo *PADS* em nível industrial, como uma função das pesquisas em escala laboratorial até o nível semi-industrial.

1.3 Estrutura da dissertação

A estrutura da dissertação de mestrado será definida conforme segue.

O Capítulo 2 traz uma breve apresentação da tecnologia *PIM*, identificando as etapas do processo, com especial enfoque nas etapas de extração de ligantes e sinterização.

No Capítulo 3 a tecnologia do plasma é apresentada com o objetivo de introduzir os conceitos de plasma associados aos processos de extração de ligantes e sinterização.

O Capítulo 4, materiais e métodos, traz uma apresentação da metodologia de projeto utilizada. Também, uma descrição das características dos processos e caracterização dos materiais utilizados..

No capítulo 5 os resultados das etapas de projeto, fabricação e homologação do reator *PADS* são apresentados, com enfoque nos resultados e discussões sobre os produtos sinterizados, obtidos pelo processamento via reator *PADS*.

Finalmente, o capítulo 6 traz uma síntese dos resultados obtidos, juntamente com sugestões para trabalhos futuros.

2. Moldagem de pós por injeção

A tecnologia *PIM* é utilizada na fabricação de componentes mecânicos de alta complexidade geométrica, para grandes lotes de produção de peças diminutas [4].

O processo divide-se em *MIM* e *CIM*, moldagem por injeção de pós metálicos e cerâmicos, respectivamente.

Basicamente, a partir da resistência dos materiais metálicos ou cerâmicos, aliada a versatilidade de forma dos polímeros, é possível obter-se uma massa de injeção pela mistura destes materiais, capaz de ser injetada em uma máquina injetora, dando a forma a um componente obtido a partir de um molde de injeção.

A carga de polímero adicionada a mistura é um veículo temporário no processo, ou seja, após a etapa de injeção a mesma finaliza seu papel, devendo ser retirada do componente injetado, no menor tempo possível e com o menor impacto sobre o mesmo, em uma etapa conhecida como extração de ligantes.

Após a extração de ligantes, o componente obtém suas propriedades mecânicas e dimensionais finais, na etapa de sinterização, a qual nada mais é do que um processo de transporte de massa ativado termicamente.

As vantagens do processo *PIM* são: economicidade para grandes lotes de produção de peças diminutas e complexas, tolerâncias dimensionais estreitas, ótimo acabamento superficial, versatilidade de composição química da liga processada, entre outras.

O processo concorre diretamente com as técnicas tradicionais de microfusão, estampagem, usinagem e metalurgia do pó.

A figura 1 traz uma comparação entre diversas técnicas de fabricação, em termos de complexidade geométrica e volume de produção [4].

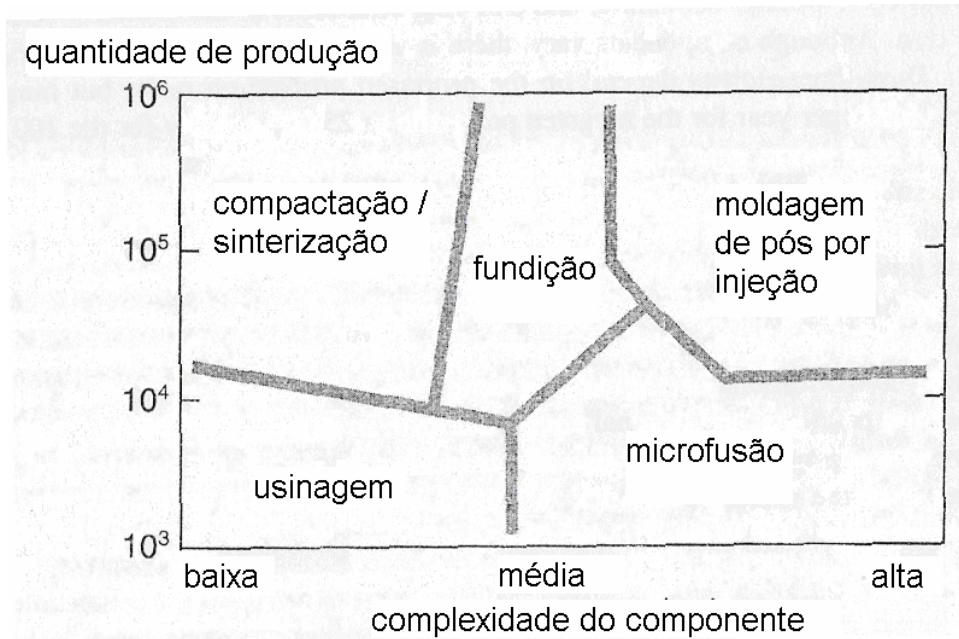


Figura 1. Volume de produção x complexidade geométrica para alguns processos de fabricação metal-mecânicos.

O processo *PIM* tem obtido uma taxa de crescimento elevada (acima de 10% ao ano) nos últimos anos, impulsionado pelo amadurecimento do mesmo no cenário internacional atual.

Este crescimento tem feito com que novos processos sejam desenvolvidos nas diversas etapas do mesmo, no sentido de melhorar o desempenho do processo, no que tange qualidade e produtividade.

As etapas que compõe o processo *PIM* são:

1. Mistura de pós e polímeros (obtenção da massa de injeção);
2. Moldagem ou injeção dos componentes;
3. Extração de ligantes;
4. Sinterização
5. Operações secundárias;

A seguir, as etapas do processo e suas características de processamento são apresentadas.

2.1 Pós e ligantes

As características das matérias-primas utilizadas no processo são fundamentais para a qualidade final do componente processado.

Os pós utilizados na *PIM* apresentam determinadas características morfológicas e químicas, as quais são fundamentais para o processamento.

Entre estas características, o tamanho de partícula e sua distribuição, formato da partícula, grau de impurezas e método de obtenção são as principais, e são avaliadas a seguir.

O tamanho de partícula deve permanecer entre 0,5 e 20 μm , de forma que o componente possua uma boa injetabilidade e alta sinterabilidade.

A distribuição do tamanho de partícula deve ser estreita ou bi-modal, de forma que o empacotamento das partículas seja elevado, não deixando desta forma espaços vazios no injetado, que pode comprometer a acuidade dimensional e demais propriedades [4].

A forma da partícula deve ser a mais arredondada possível, obtendo assim uma boa injetabilidade e alta sinterabilidade. Partículas mais irregulares, em contra partida, apresentam maior retenção de forma do injetado durante a etapa de extração de ligantes [4].

O grau de impurezas deve ser o menor possível, pois as mesmas podem dificultar o processo de sinterização. As impurezas mais frequentes presente nos pós são oxigênio e carbono. O oxigênio pode estabilizar um óxido de alta estabilidade termodinâmica, dificultando a difusão em altas temperaturas, prejudicando a sinterabilidade do material.

O carbono, quando retido na peça, de forma indesejada, pode levar a formação de fases eutéticas, em altas temperaturas, gerando uma fase líquida, a qual leva a uma perda de retenção de forma do injetado.

O método de obtenção do pó define as características citadas acima. Dentre os processos de obtenção mais utilizados, há:

1. Atomização (a gás ou a água);
2. Processo carbonila (decomposição química);
3. Trituração e moagem;

4. Oxidação e cominuição mecânica;

Os ligantes representam a segunda classe de materiais utilizados no processo. Três características são fundamentais para os ligantes no processo *PIM*. São elas:

1. Resistência mecânica à peça injetada (peça à verde);
2. Redução da viscosidade da mistura na etapa de injeção (ação lubrificante);
3. Ação surfactante (formação de ‘ponte’ entre pó e polímero) para aumento da homogeneidade da mistura;

Devido a estas características não serem encontradas em um único polímero, a utilização de um sistema ligante se faz necessária. O sistema ligante é constituído de polímeros que possuem estas características. Estes polímeros são em sua maioria:

1. Termoplásticos de elevada resistência ao manuseio após a injeção (polímero *back bone*);
2. Ceras e polímeros de alto índice de fluidez para aumento da lubrificação na etapa de injeção;
3. Ceras e ácidos graxos que possuem ação surfactante, para maior grau de homogeneidade da mistura;

Os polímeros mais utilizados na *PIM* são os termoplásticos e ceras. Exemplos de utilização são: *comodities* de plásticos, como PP, PE, POM, PS, entre outros. Para as ceras, parafinas, cera de carnaúba e microcristalina são muito utilizadas.

A quantidade relativa entre o polímero *back bone* e o lubrificante, via de regra, é de 50-50% em volume. Variações de até 80-20% em volume entre ambos são possíveis de serem utilizadas. A adição do surfactante é da ordem de 1 a 2% em massa sobre o total da fase ligante [4].

2.2 Obtenção do *feedstock*

A massa de injeção (*feedstock*) obtida a partir da mistura entre os pós e o sistema ligante deve apresentar características reológicas adequadas à etapa de injeção, bem como

apresentar boa homogeneidade, de forma a evitar a formação de defeitos nas etapas de processo posteriores.

A quantidade relativa entre pós e ligantes adicionados a mistura é fundamental para o êxito ou insucesso no processamento dos componentes injetados.

Teoricamente, a quantidade de fase ligante a ser adicionada à mistura deve ser a menor possível, de forma a prover uma fina camada de ligante entre cada partícula de pó (conhecido como carregamento sólido crítico). Excesso de fase ligante irá causar perda de forma do injetado. A falta de fase ligante irá dificultar a obtenção da mistura e a etapa de injeção.

Na prática, para metais, o carregamento de fase ligante é da ordem de 40% em volume. Para cerâmicos, este percentual é de 50%. Como a densidade entre o pó e o sistema ligante é bastante diferente, em percentual em massa, a quantidade de ligante, para metais, é da ordem de 7 a 10 %, enquanto que para cerâmicos, 12 a 15 %.

O processo de mistura ocorre à quente, ou seja, os componentes são aquecidos a uma temperatura onde a fase ligante é totalmente fundida, de forma a homogeneização ser elevada.

A faixa de temperatura utilizada depende da temperatura de fusão dos polímeros utilizados, e na prática é compreendida entre 150 e 190 °C.

O método de mistura influencia a homogeneidade da massa de injeção. Os misturadores mais utilizados são: planetário com garfos, misturador tipo parafusos gêmeos, *sigma-blade*, entre outros.

Após a massa ser obtida, a mesma é resfriada e peletizada em pequenos grânulos, de forma a alimentar adequadamente o funil da máquina injetora, na etapa de injeção.

2.3 Injeção

A etapa de injeção compreende a obtenção da peça, com sua geometria desejada, a partir de um molde de injeção, o qual é fixo à máquina injetora e preenchido com a massa de injeção, após o seu fechamento.

A principal característica da etapa de injeção no processo *PIM* está no tamanho do componente injetado, que é maior do que a peça final desejada. Este superdimensionamento está relacionado a carga de ligantes adicionada à massa de injeção (conhecido como fator de retração). Isto significa que do início até o final do processamento, a peça irá retrair dimensionalmente, como consequência da retirada da fase ligante e sinterização das partículas de pó (cerca de 17 a 23 % de retração linear).

Esta retração é diretamente proporcional a quantidade de polímero adicionada. Quanto maior a quantidade de polímeros, maior será a retração, por outro lado, mais difícil será a retenção de forma do injetado.

O molde de injeção contém a forma da peça desejada. A dureza do material da cavidade do molde deve ser elevada de forma a suportar a pressão na cavidade do molde durante a injeção e o desgaste abrasivo do molde. A planicidade entre as placas do molde e linhas de fechamento deve apresentar uma excelente qualidade, de forma a evitar a geração de rebarbas. Características como canal de injeção, de alimentação, poços frios, escape de gás e ponto de injeção devem ser levados em consideração durante a etapa de projeto do molde.

A máquina injetora utilizada é similar àquela utilizada na injeção de materiais termoplásticos.

As diferenças mais evidentes são: resistência ao desgaste abrasivo do canhão e da rosca, os quais devem apresentar uma resistência ao desgaste abrasivo maior, devido ao atrito provocado pelo pó (metálico ou cerâmico) ser maior que o apresentado pelos polímeros. Este aumento de resistência ao desgaste abrasivo é fruto de um tratamento superficial como nitretação gasosa ou a plasma. Também, a distância relativa entre os filetes da rosca e entre a rosca e o canhão, a qual é menor, de forma a provocar um maior cisalhamento do material, necessário para um completo e adequado preenchimento da(s) cavidade(s) do molde de injeção.

O ciclo de injeção contempla as seguintes etapas:

1. Fechamento do molde;
2. Injeção do material para dentro da(s) cavidade(s) do molde;
3. Etapa de recalque para preenchimento completo da cavidade e solidificação do ponto de injeção;

4. Resfriamento da peça a partir de troca de calor do molde com água e dosagem do material para o próximo ciclo de injeção;

5. Abertura do molde e extração da peça a partir de pinos extratores;

A máquina injetora deve possuir capacidade de injeção e pressão de injeção condizentes com o volume de material necessário para o preenchimento da(s) cavidade(s) do molde. Uma pressão de fechamento maior do que a pressão de injeção se faz necessária, de forma a evitar a abertura entre as placas do molde, o que pode levar a geração de defeitos no componente injetado.

Os tipos de máquinas injetoras atualmente utilizadas para o processo são: hidráulica, elétrica e mecânica. Geralmente, a capacidade de força de fechamento requerida para uma máquina injetora, no processo *PIM*, varia entre 30 e 200 toneladas.

2.4 Extração de ligantes

A etapa de extração de ligantes consiste na remoção da fase ligante adicionada à massa de injeção. O objetivo da extração de ligantes é promover a retirada dos polímeros no menor tempo possível com o menor impacto sobre a retenção de forma do injetado.

Existem, atualmente, diversas formas de remoção do sistema ligante no processo *PIM*.

A mais utilizada, entre todas as técnicas, é a extração química seguida da extração térmica. A utilização de duas etapas para a remoção do ligante facilita a retirada do mesmo, devido ao menor tempo necessário e o menor impacto sobre a retenção de forma sobre o injetado.

Como o sistema ligante utilizado é multicomponente, cada polímero apresenta uma temperatura de remoção diferente, fazendo com que os mesmos saiam em etapas.

Se esta afirmação não for verdadeira, então toda a fase ligante deixa o injetado na mesma faixa de temperatura, provocando um aumento excessivo da pressão interna do injetado (devido a ausência de espaços vazios para a saída dos mesmos), com conseqüente formação de defeitos como bolhas, trincas e/ou deformações.

Assim, a etapa química de extração de ligantes constitui uma rápida e eficiente possibilidade de retirar o primeiro ligante, geralmente a polímero lubrificante, sem provocar efeitos indesejados sobre o polímero *back bone*. Desta forma, o injetado retém sua forma sem distorções, abrindo uma porosidade interna interconectada (devido a saída do polímero lubrificante), fundamental para a retirada do próximo polímero na etapa térmica, sem o surgimento de defeitos e em um menor tempo.

A ação química de um solvente (geralmente orgânico) provoca a dissolução química do polímero solúvel a este solvente, primeiramente na superfície da peça. A partir da abertura da porosidade superficial, por força capilar o solvente penetra no interior da peça, dissolvendo toda a fase ligante solúvel.

O tempo de extração química é uma função da espessura da peça. Quanto mais espessa a peça, maior o tempo de permanência do injetado so a ação química do solvente.

A extração térmica de ligantes ocorre sob condições de atmosfera e taxa de aquecimento controladas, de forma a causar o menor impacto sobre o componente, retirando todo o restante de ligante da peça, sem a permanência de nenhum resíduo na mesma.

O mecanismo de degradação térmica está associado a fusão e posterior evaporação do polímero, que ao evaporar, por força capilar, é retirado do componente injetado, e pela presença da atmosfera do forno (gás de arraste) e temperatura deste gás, o mesmo é degradado e removido na forma de gases para fora do forno [6].

Geralmente, taxas de aquecimento extremamente lentas (da ordem de menos do que 1° C/min) são empregadas, de forma que o polímero seja degradado termicamente sem provocar distorções durante sua saída do injetado. A porosidade aberta na etapa anterior é fundamental para o sucesso da extração térmica, pois sem ela a probabilidade de formação de defeitos sobre o injetado é muito grande.

Em função da reatividade do material processado, a atmosfera pode ser oxidante, redutora ou inerte. Para aços inoxidáveis, deve ser utilizada uma atmosfera redutora (hidrogênio). Para ligas Fe-Ni e materiais cerâmicos, pode ser utilizada a extração com atmosfera oxidante.

Como parte final da etapa de extração de ligantes, a pré-sinterização do componente é realizada, de forma ao mesmo obter resistência mecânica ao manuseio suficiente para a retirada do forno de extração de ligantes e encaminhamento para a etapa de

sinterização. A pré-sinterização ocorre geralmente em uma faixa de temperatura compreendida entre 650 e 1000° C.

A permanência de polímero residual na peça é indesejada, pois se o mesmo ficar retido no componente, durante a sinterização, o mesmo (na forma de carbono) pode levar a alteração da estequiometria da liga, alterando as propriedades dos materiais. Também, pode levar a formação de fases líquidas indesejadas (devido à formação de fases eutéticas, de baixo ponto de fusão), provocando distorções dimensionais no componente.

Outras técnicas de extração de ligantes, como leito poroso, puramente térmica, catalítica, entre outras, são utilizadas, com variações na característica da extração, apresentando vantagens e desvantagens, as quais são avaliadas a partir do tipo de processamento, custos envolvidos e qualidade final do injetado.

2.5 Sinterização

A sinterização é um processo de transporte de massa ativado termicamente. A força motriz para o processo de sinterização está presente na forma de superfície livre das partículas, a qual é a energia livre em excesso para o processo (ΔG) [7].

Desta forma, quanto menor for a distribuição do tamanho de partícula do pó, maior a sua área superficial (para um mesmo volume), e conseqüentemente, maior será a sua energia específica livre. Assim, pode-se afirmar que quanto menor o tamanho de partícula, maior é a sinterabilidade do pó.

O processo de sinterização ocorre sob três parâmetros de processo: temperatura, tempo e atmosfera do forno de sinterização.

Os fenômenos presentes no transporte de massa que mais contribuem para a sinterização no processo *PIM* são:

1. Difusão volumétrica via vacâncias;
2. Difusão em contorno de grão;

Os três estágios presentes no processo de sinterização são:

1. Formação de contatos (*necks*);

2. Crescimento de grão e redução da porosidade;
3. Isolamento e arredondamento dos poros;

A figura 2 ilustra o início do processo de sinterização, com a formação de contatos de sinterização entre as partículas de pós (*necks*) [4].

A redução da porosidade a níveis inferiores a 5% (densificação maior do que 95% da densidade teórica do material) em volume é uma característica do pequeno tamanho de partícula e altas temperaturas de sinterização utilizados no processo *PIM*.

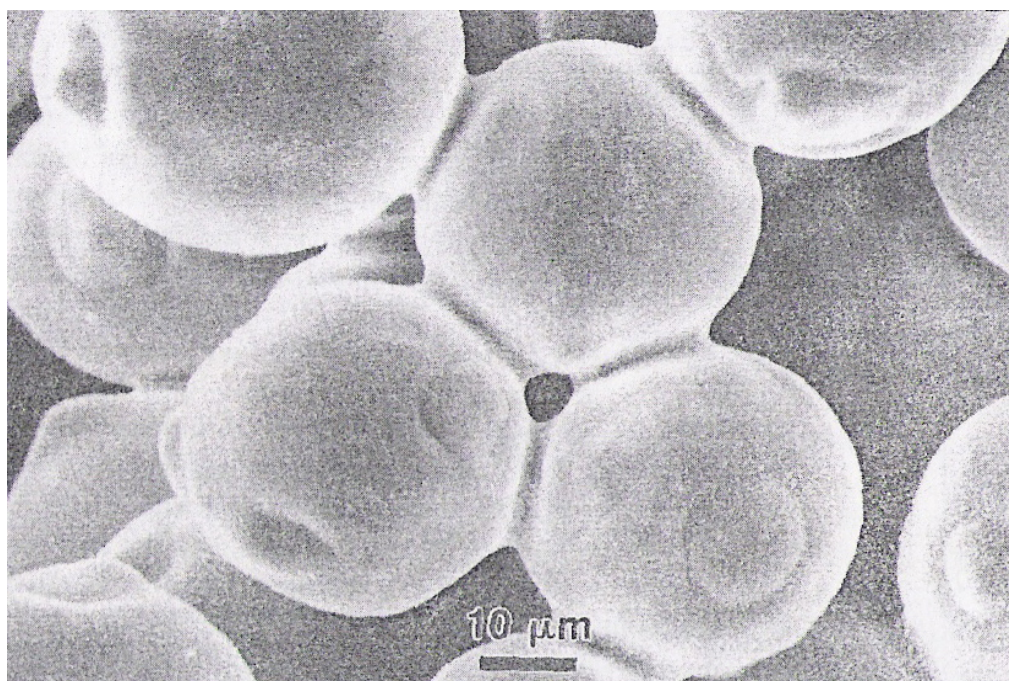


Figura 2. Início do processo de sinterização, com a formação de contatos de sinterização entre partículas de pó.

A sinterização na *PIM* ocorre, via de regra, no estado sólido, sem a formação de fase líquida. A formação de fase líquida leva o componente a sofrer deformações indesejáveis, se o percentual volumétrico de fase líquida for maior que 5% (perda de retenção de forma). Assim, a temperatura de sinterização não deve ultrapassar a temperatura de fusão do material (geralmente utiliza-se entre 0,85 e 0,90 da temperatura de fusão do material).

É na etapa de sinterização que o componente experimenta sua grande retração dimensional (cerca de 17 a 23 % linear). É também na sinterização que o material sofre, se não controlado adequadamente, o maior grau de distorções, devido a ação da gravidade, das elevadas temperaturas e apoio inadequado do componente.

A atmosfera de sinterização é fundamental para o sucesso do processo de densificação do componente. Basicamente, quatro tipos de atmosfera podem ser utilizadas:

1. Inerte: quando a mesma não influencia o processo de sinterização (ex.: argônio, vácuo);

2. Oxidante: a atmosfera inibe a difusão devido a alta estabilidade de óxidos formados (oxigênio formando óxido de cromo para o aço inoxidável). Para materiais cerâmicos é a atmosfera utilizada;

3. Redutora: a presença de um gás rico em um elemento redutor de fases estáveis favorece o processo de sinterização (hidrogênio, reduzindo o óxido de cromo, na sinterização do aço inoxidável);

4. Descarboxante: a presença de um gás descarboxante pode levar a redução do teor de carbono desejado na estequiometria da liga (oxigênio e hidrogênio na sinterização de aços ao carbono);

Assim, a escolha de uma atmosfera adequada se faz necessária para uma alta densificação do material.

As temperaturas de sinterização para os materiais metálicos ferrosos variam, na média, entre 1250 e 1350 °C. Para os cerâmicos, a faixa de temperatura está entre 1450 e 1800 °C. Os tempos de patamar de sinterização são curtos, da ordem de 1 a 3 horas. As taxas de aquecimento variam entre 5 e 30 °C/min.

Os fornos de sinterização mais utilizados são os fornos contínuos e de batelada. Dependendo do volume de produção e da reatividade do material, os mesmos apresentam vantagens e desvantagens, as quais devem ser levadas em consideração na hora da definição do ciclo de sinterização do material.

2.6 Operações Secundárias

O processo *PIM*, teoricamente, finaliza-se após a etapa de sinterização. Porém, algumas vezes é necessária a introdução de uma ou mais características sobre o material, de forma a agregar valor ao produto final (dependendo da necessidade da aplicação).

Assim, existem operações pós sinterização utilizadas em componentes *PIM*, com o objetivo de modificar (otimizar) sua performance [8]. Entre elas:

1. Tratamento térmico (aumento da resistência mecânica e ao desgaste);
2. Tratamento superficial (aumento da resistência à corrosão ou diminuição do coeficiente de atrito);
3. Usinagem ou calibração (alcançe de tolerâncias dimensionais ou de forma mais estreitas às alcançadas com o processo *PIM*);
4. Compactação isostática à quente (*HIP*) para densificação do material a níveis muito próximos a densidade total do material (100%);

3. Tecnologia de plasma aplicada ao processamento de materiais

3.1 Descargas de plasma em baixa pressão

Existem diversas formas de geração de descargas de plasma, de forma artificial. As descargas de plasma em baixa pressão constituem um campo de descargas muito utilizadas no processamento de materiais. Estas descargas caracterizam-se pela utilização de pressões negativas (abaixo da P_{atm}).

3.1.1 Conceitos de física de plasmas

Pode-se definir o plasma como um sistema de elétrons livres, íons e átomos neutros [9]. Tal sistema é considerado eletricamente neutro, ou seja, contém um número de partículas de carga positiva igual ao número de partículas carregadas negativamente.

Apesar de que provavelmente mais de 99,9% da matéria do universo seja ionizada, isto é plasma, em nosso planeta o mesmo tem que ser gerado por processos físicos (artificiais) e sob condições especiais.

Em nosso planeta o meio que se assemelha a um plasma ideal é um gás parcialmente ionizado. Este meio se introduz à experiência pré-histórica da humanidade em forma de fogo, de raios e de auroras boreais.

A identificação de um meio criado por descargas elétricas em gases como quarto estado da matéria, foi dado por William Crookes em 1879. Na época já era evidente que eram necessárias condições especiais para a geração de plasma, dadas as características de nosso

denso e frio planeta. Assim, pesquisas dessas condições foram sujeitas à física das descargas elétricas em gases, e só quando técnicas de vácuo e elétricas foram desenvolvidas ao ponto de gerarem-se descargas elétricas relativamente estáveis e de longa vida, emergiu a física de plasma como um campo separado de estudo. Desta maneira, no ano 1923 I. Langmuir desenvolveu a teoria básica de um gás ionizado e deu ao meio o nome de “Plasma”

Todos os estados da matéria representam diferentes graus de organização, aos quais corresponde certo valor da energia de ligação de seus componentes. Assim, por exemplo, no estado sólido esta energia corresponde à força de enlace entre as moléculas em um cristal. Se a energia cinética media por molécula excede a energia de ligação, a estrutura cristalina quebra-se atingindo o estado líquido ou gasoso.

Da mesma maneira, a matéria pode existir como plasma quando a energia cinética por partícula excede o potencial de ionização dos átomos, a qual usualmente é de alguns poucos elétronvolts (eV). Esta energia cinética, chamada energia de ionização, é obtida pela aplicação de uma diferença de potencial entre dois eletrodos em um sistema fechado e mantido a baixa pressão, transferindo-se energia do campo elétrico ao gás.

Qualquer processo de ionização de um gás pela aplicação de um campo elétrico é chamado de descarga, e quando o gás é ionizado suficientemente para emitir luz é conhecido como descarga luminescente. A descarga pode ser obtida de diversas maneiras dependendo do tipo de gerador: corrente contínua, corrente pulsada, radio frequência e alta frequência entre outras.

A descarga de corrente contínua está dividida em varias regiões dependendo da tensão e corrente aplicada [10], como é mostrado na figura 3.

Na descarga de corrente continua existem dois grandes grupos de descargas, as auto-sustentáveis e as não sustentáveis, dependendo das condições energéticas das partículas presentes. Como exemplos de descargas auto-sustentáveis encontram-se a descarga de arco e a descarga luminescente, na qual distinguem-se varias regiões.

Destas regiões, chama-se a atenção para a descarga luminescente anormal, que será utilizada no trabalho proposto, por duas razões: por envolver completamente o cátodo e por possuir uma relação entre tensão e corrente que facilita o controle do processo. Estes dois

fatores podem-se explicar analisando as zonas vizinhas da descarga luminescente anormal: a descarga luminescente normal e a descarga de arco.

Na primeira, como a corrente de descarga está variando e a tensão permanece invariável (ver figura 3), o que esta mudando é a área através da qual a corrente flui. Desta maneira, quando aumenta-se a corrente aumenta-se a superfície de contato até que a mesma envolve totalmente o cátodo, e começa então o aumento da tensão, pois já não há mais superfície livre.

Neste momento chega-se à descarga luminescente anormal, onde a corrente e a tensão tem uma relação linear. Após, vai-se formar a descarga de arco, onde ocorre um corte na tensão enquanto a corrente é incrementada, concentrando-se esta em um ponto, instantaneamente, causando danos por superaquecimento e fusão desse ponto.

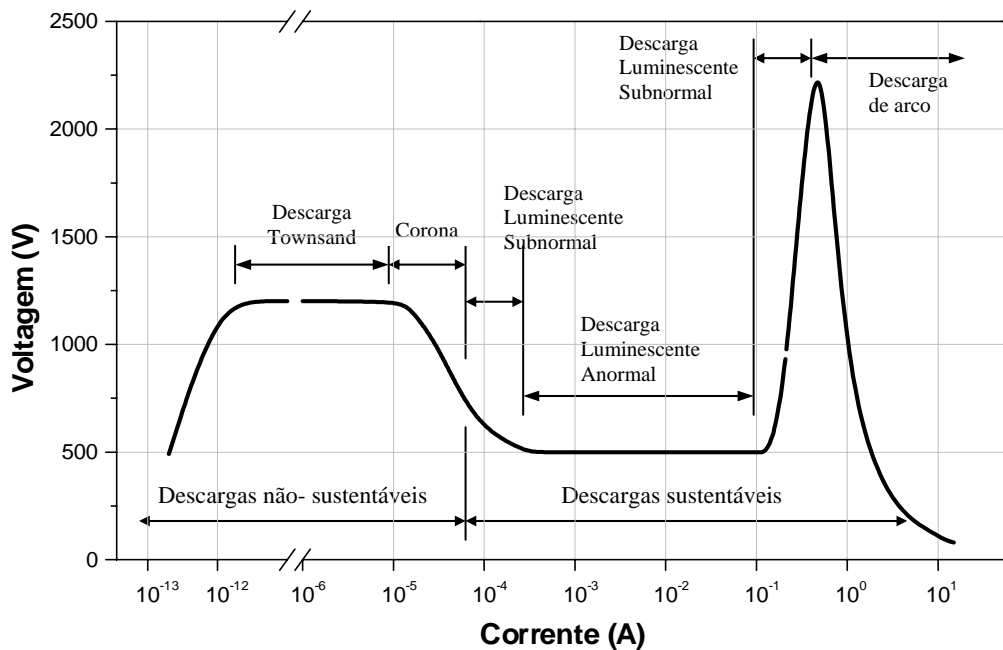


Figura 3. Descarga luminescente de plasma.

3.1.2 Processos de colisão em descargas elétricas fora do equilíbrio (plasma)

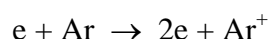
Uma descarga elétrica (plasma pouco ionizado) é composta por diversas espécies, as quais possuem diferentes energias. Estas energias das espécies provocam colisões entre elas, do tipo elástica (transferência de energia cinética) ou inelástica (alteração da energia interna das moléculas ou átomos) [11].

As colisões inelásticas presentes no plasma são de grande interesse para o processamento de materiais, pois este tipo de colisão promove a geração das espécies reativas necessárias ao processamento dos materiais por plasma.

As espécies de interesse presentes em uma descarga de plasma são os íons, elétrons e átomos neutros. A interação entre estas espécies está relacionada com a seção de choque colisional, que depende das características do plasma, como pressão, voltagem, gás de processo, entre outras.

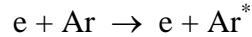
A seguir, são apresentados alguns tipos de colisões inelásticas presentes em uma descarga de plasma.

- **ionização:** o processo de ionização está relacionado a colisão de elétrons (presentes na descarga) com átomos ou moléculas de gás, no ambiente de processamento. O elétron que possui energia igual ou maior ao menor potencial de ionização do átomo, com quem este colidiu, promove a saída de um elétron do orbital mais externo do átomo (mais fracamente ligado ao núcleo), formando um par elétron-íon. Este tipo de colisão é essencial na manutenção da descarga de plasma, devido ao seu efeito multiplicativo, formado pela aceleração, a partir de um campo elétrico, nestes elétrons gerados pela ionização. Estes elétrons são capazes de produzir novas ionizações, formando o efeito cascata. A equação a seguir ilustra o processo de ionização de um átomo de argônio.

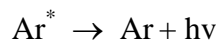


- **excitação:** a excitação está relacionada a transferência de um elétron livre para um elétron periférico (mais externo) de um átomo. Esta transferência possui uma energia menor do que a de ionização do átomo. Desta forma, ocorre uma mudança de energia dentro

do átomo (aumento). A energia necessária para promover a excitação está relacionada ao potencial de excitação do átomo. A equação abaixo ilustra o processo de excitação de um átomo de argônio.



- **relaxação:** o processo de relaxação é o oposto da excitação. Neste processo, elétrons excitados perdem energia para um elétron livre, decaindo para um nível energético inferior. Este processo tem a característica de apresentar visualmente, uma luminosidade, pois durante a relaxação o elétron emite um fóton contendo energia, energia esta relacionada à diferença de energia entre os níveis quânticos do mesmo. A equação a seguir mostra um exemplo de relaxação.



- **recombinação:** a recombinação é o inverso da ionização. Devido às leis da conservação da energia e da quantidade de movimento, a probabilidade de recombinação entre dois corpos é pequena, sendo a recombinação a três corpos mais comum de ocorrer. De maneira prática, este processo de recombinação está associado ao bombardeamento iônico contra o eletrodo catodo. Uma vez que íons (partículas positivamente carregadas) tendem, por força eletrostática, se recombinarem com partículas negativamente carregadas (geralmente um catodo, eletrodo negativamente carregado). Desta colisão é provocada uma grande liberação de energia, na forma de calor (podendo chegar a 3200K, microscopicamente). Este processo de recombinação gera elétrons secundários, os quais são de grande interesse para o processamento de materiais por plasma, principalmente para a extração de ligantes assistida por plasma.



A quantidade de elétrons secundários arrancados do catodo depende do material do mesmo e da energia do íon incidente.

3.1.3 Plasma pouco ionizado

Um plasma pouco ionizado é caracterizado pela ionização de um gás rarefeito, a partir da aplicação de uma diferença de potencial elétrico (d.d.p.) entre dois eletrodos (catodo e anodo), em um sistema fechado a baixa pressão. Esta ionização é gerada, usualmente, pela aplicação de um sinal de tensão DC constante ou pulsado, RF ou HF.

O termo pouco ionizado deve-se ao fato de que uma quantidade muito pequena de partículas é ionizada, em relação a quantidade de átomos existentes no sistema. Tipicamente, para cada partícula ionizada existem 1×10^5 átomos ou moléculas neutras (grau de ionização).

A partir do par tensão–corrente, intencionalmente utilizados, uma descarga elétrica luminescente em regime anormal é obtida.

Esta descarga em regime anormal possui a característica de envolver completamente o catodo (formação de uma bainha catódica), apresentando uma proporção entre tensão e corrente, possibilitando desta forma um maior controle sobre o processo.

Este tipo de descarga é obtido a partir do aterramento do anodo (0 V) e da aplicação de um potencial elétrico negativo sobre o catodo, tipicamente entre -300 a -800 V. Para a obtenção de uma descarga homogênea, sem o surgimento de arcos voltaicos (picos de corrente elétrica) ou extinção da mesma, é necessária uma distancia entre os eletrodos adequada, de forma que um potencial ligeiramente positivo é formado, da ordem de 20 V. Esta distancia, usualmente, é da ordem de 5 a 15 milímetros.

Nesta região entre o catodo e o anodo, de elevada d.d.p., o gás inserido é ionizado, formando uma região extremamente reativa, de espécies de interesse para o processamento de materiais, conhecida como região luminescente.

Esta região luminescente, devido ao campo elétrico gerado pela queda do potencial entre os dois eletrodos, acelera as partículas com carga positiva contra o catodo, provocando colisões, liberando calor e gerando elétrons secundários.

A quantidade de colisões geradas na região luminescente depende da pressão de trabalho (que varia entre 0,01 e 30 Torr), medido, pela seção de choque entre as espécies.

Via de regra, quanto maior a pressão, menor a área de choque, ou seja, menor é a região luminescente, como também mais concentrada a região de espécies reativas de

interesse (a bainha catódica diminui com o aumento da pressão, provocando um confinamento da descarga sobre uma região muito próxima à do cátodo).

Estrategicamente, os parâmetros de plasma devem ser definidos de forma que a região luminescente seja maior ou menor, dependendo do processamento desejado. Também, a distância entre os eletrodos deve ser criteriosamente definida.

A figura 4 ilustra os fenômenos ocorridos em uma descarga de plasma em regime anormal entre dois eletrodos.

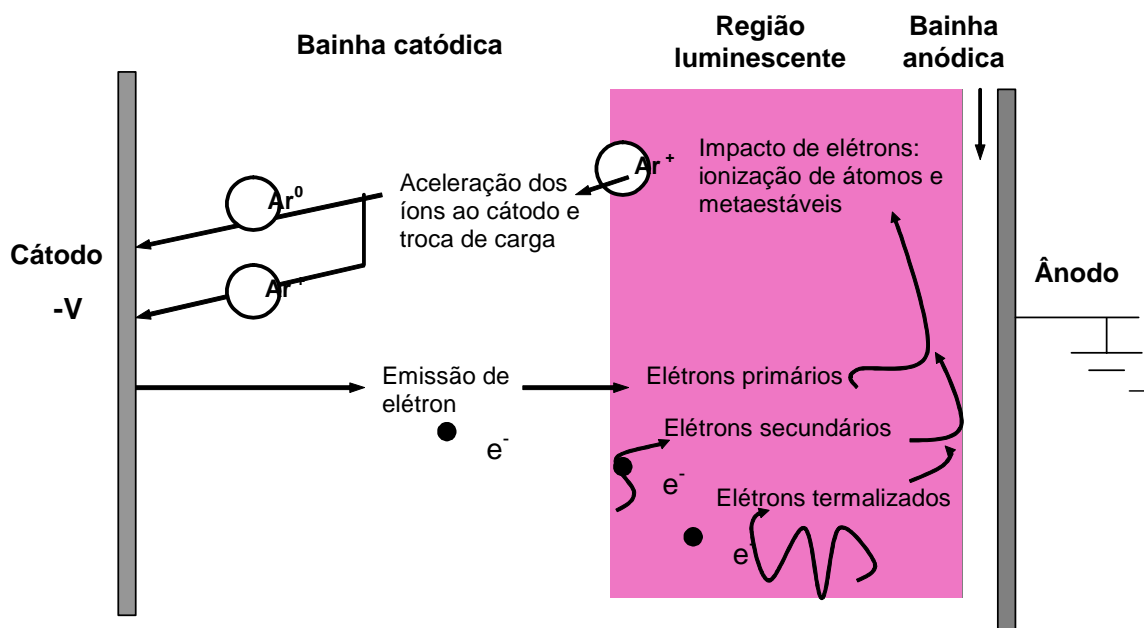


Figura 4. Descarga de plasma em regime anormal, gerada entre dois eletrodos.

3.2 Processamento de materiais por plasma

3.2.1 Extração de ligantes e sinterização assistidos por plasma

A tecnologia do plasma aplicada aos processos de metalurgia do pó e moldagem de pós por injeção tem sido desenvolvida por pesquisadores da UFSC nos últimos dez anos.

Estudos na área de remoção de polímeros e sinterização por plasma têm revelado potencialidades da utilização de descargas de plasma, de forma a otimizar a performance dos componentes sinterizados e/ou reduzir o tempo de processamento destes materiais, em virtude da influência das espécies reativas presentes em uma descarga de plasma [1,2].

A sinterização assistida por plasma, quando da disposição das peças sobre o eletrodo cátodo, promove uma densificação superior da superfície, como também um enriquecimento superficial pela deposição de filmes finos, através de *sputtering* [1].

A atuação de íons sobre a peça, através da colisão destes contra as peças dispostas sobre o catodo promove um aporte de calor na superfície da mesma, promovendo uma alta sinterabilidade nesta região [1].

O bombardeamento de íons sobre o cátodo promove o desprendimento de pequenos átomos do material do mesmo, os quais são depositados sobre a peça (também no catodo), formando filmes finos, os quais podem apresentar vantagens sobre o ponto de vista tribológico e mecânico (Ex.: deposição de filmes de Cr, Ti, Mo e C).

A extração de ligantes por plasma promove a remoção dos polímeros da peças através da ação de elétrons secundários [12]. A geração destes elétrons, a partir da colisão de íons sobre o catodo, faz com que os mesmos sejam “consumidos” pelo anodo. Quando as peças são dispostas, estrategicamente, sobre o anodo (ou potencial flutuante, em torno de – 30 V) estes elétrons colidem contra a superfície das peças.

Estas colisões de elétrons secundários contra as peças fazem com que o polímero presente na superfície da peças seja bombardeado, promovendo uma quebra na cadeia do mesmo, de forma que o mesmo seja evaporado mais facilmente, devido ao seu menor comprimento de cadeia (menor peso molecular).

Esta quebra das cadeias de polímero e conseqüente evaporação do mesmo promove um gradiente químico entre a superfície e o núcleo da peça. Por força capilar, nova frente de polímero chega à superfície, a qual é bombardeada, de forma que a extração se dá de forma mais rápida e com menor nível de distorções sobre os componentes injetados / compactados.

A evaporação destes radicais C_xH_y (ex.: CH_3^+) é estabilizada pela presença de íons de hidrogênio (H^+), formando hidrocarbonetos (ex.: CH_4), os quais são removidos da câmara de processamento pela ação de um sistema de vácuo. Esta forma de remoção de polímeros possibilita uma limpeza da câmara de processamento, o que permite a sinterização dos componentes no mesmo ciclo e equipamento, reduzindo o tempo total de processamento.

A figura 5 ilustra os mecanismos presentes em uma extração de ligantes assistida por plasma, em uma câmara fechada sob atmosfera negativa e descarga de plasma [13].

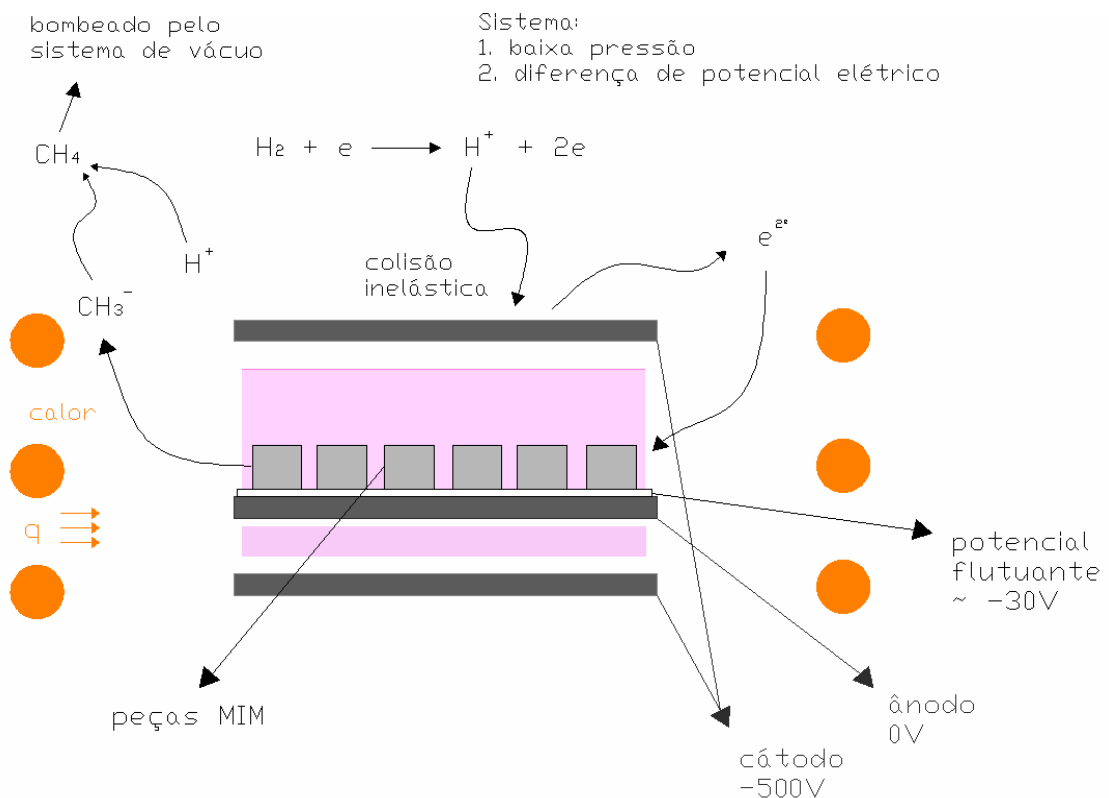


Figura 5. Processo de extração de ligantes em um reator contendo uma descarga de plasma.

A utilização de um aquecimento resistivo auxiliar possibilita um maior controle sobre a potência do plasma aplicada no processamento, como também na taxa de aquecimento utilizada na extração de ligantes e sinterização.

3.2.2 Tratamentos termoquímicos por plasma

O plasma pode ser empregado, em escala industrial, em processos de tratamentos superficiais de materiais metálicos, como nitretação a plasma, processo PVD (*physical vapour deposition*), *sputtering* e outros. Estes processos têm substituído com sucesso processos convencionais de nitretação gasosa, CVD (*chemical vapour deposition*) e outros.

A disposição das peças a serem tratadas sobre o catodo promove o bombardeamento iônico, o qual enriquece a superfície das mesmas.

No caso da nitretação, íons de nitrogênio colidem sobre a superfície da peça [14], que geralmente, contem elementos formadores de nitretos, como Al, Ti, W, Va, Cr e outros. Estes nitretos formados na superfície da peça promovem um aumento muito significativo da dureza na superfície da peça, podendo chegar a mais de 1000 HV de dureza, com espessura de camada da ordem de 0,15 mm (camada branca e de difusão).

No processo PVD, o exemplo mais significativo é o revestimento de nitreto de titânio sobre a superfície de ferramentas de corte. A disposição das peças sobre um catodo de titânio e uma atmosfera rica em íons de nitrogênio (com parâmetros de plasma adequados) provoca o *sputtering* de átomos de Ti, que se combinam com íons de N, sendo estes nitretos formados depositados sobre a superfície das peças.

Este processo promove um aumento da resistência ao desgaste da ferramenta, necessário devido as altas velocidade de corte e temperaturas atingidas durante o processo de usinagem.

Outros processos de *sputtering* têm sido utilizados em escala industrial, de forma a melhorar a performance tribológica de materiais metálicos.

4. Metodologia de desenvolvimento do reator

4.1 Ferramentas de metodologia de projeto

A metodologia de projeto baseada em Pahl & Beitz [15] visa à estruturação e solução de um problema em etapas, as quais possuem uma relação de hierarquia, iniciando de forma macro (definição das necessidades), resultando em um produto com especificações detalhadas.

Entradas (necessidades) → **metodologia do projeto** → *Saídas* (especificações detalhadas)

A seqüência de fases definida por:

- clarificação da tarefa;
- geração do conceito;
- leiaute preliminar;
- leiaute definitivo;
- detalhamento e documentação;

possibilita a utilização de ferramentas que auxiliam o processo de desenvolvimento do projeto, de forma que etapas fundamentais não sejam esquecidas, reduzindo o tempo de lançamento do mesmo bem como o de retrabalhos futuros.

A metodologia de projeto apresentada é composta de quatro etapas:

1. Projeto informacional;
2. Projeto conceitual;
3. Projeto preliminar;
4. Projeto detalhado;

4.1.1 Projeto informacional

A etapa de projeto informacional consiste, inicialmente, na definição dos usuários [16] e suas necessidades (requisitos dos usuários). Após, estes requisitos são traduzidos para linguagem de engenharia, na forma de requisitos de projeto.

Através da ferramenta *QFD* (*Quality Function Deployment*), é possível gerenciar estes requisitos de clientes e de projeto, de forma a correlacionar os mesmos, definindo os pontos importantes e mais relevantes do projeto. Esta ferramenta é conhecida como “Casa da Qualidade” [17].

A partir desta avaliação de prioridades em relação aos requisitos dos usuários, traduzidos em requisitos de projeto, são definidas as especificações de projeto, que são as diretrizes para o projeto em si. Estas especificações, listadas em ordem de prioridade (através de técnica de valoração), funcionam como ponto de partida para a definição do conceito.

Um exemplo é dado a seguir para exemplificar esta técnica.

1. Requisito de usuário: carro espaçoso;
2. Requisito de projeto: carro com porta-malas para uma família com 5 pessoas;
3. Especificação de projeto: porta-malas com capacidade mínima de 900 litros;

4.1.2 Projeto conceitual

O projeto conceitual consiste no desdobramento da função técnica total (objetivo macro) em funções parciais, menores (condições para alcançar o objetivo).

A estrutura funcional do produto define as entradas, objetivo e saídas do projeto. A partir de funções de 1ª ordem, ou funções básicas para a realização do objetivo, os subsistemas do produto são definidos. A partir daí, através da técnica da síntese funcional, as funções hierarquicamente inferiores são definidas, de forma a obtenção de um detalhamento do produto, a partir de uma matriz morfológica [18].

O detalhamento das funções parciais do produto possibilita uma visão ampla de todo o produto, de forma que durante a concepção das alternativas conceituais, todas estas funções sejam levadas em consideração.

A etapa de alternativas conceituais expressa a capacidade de criação, ou seja, a essência da engenharia aplicada ao desenvolvimento de produtos.

Após as alternativas serem criadas, as mesmas são avaliadas segundo uma matriz de avaliação (matriz morfológica), que leva em consideração os critérios (requisitos) de usuário e alternativas de solução. A alternativa conceitual escolhida passa a ser a solução conceitual, que é então descrita, em forma de desenhos, especificações e dimensionamentos, que serão realizados na etapa de projeto preliminar.

4.1.3 Projeto preliminar

Na etapa de projeto preliminar, determinam-se os principais parâmetros dimensionais / estruturais do produto.

Nesta fase os cálculos de resistência e capacidades são realizados, de forma a otimizar a relação custo / benefício do sistema. As especificações de projeto são dimensionadas nesta etapa. Após o dimensionamento, as mesmas são verificadas através de ensaios, simulações e testes (quando aplicável).

Geralmente, a partir das funções de 1ª ordem definidas (ou sub-sistemas), ocorre o detalhamento das mesmas, em termos de dimensionamento, definição de materiais, custos, etc. O leiaute é analisado ao final desta etapa, sendo julgado quanto a sua otimização.

4.1.4 Projeto detalhado

O projeto detalhado compreende as descrições definitivas do produto, ou seja, leiaute definitivo, montagens, desenhos técnicos, automação, documentação final, instruções de trabalho (manual de operação) e especificações finais.

Nesta etapa são definidos os fornecedores, processos de fabricação a serem utilizados, cronograma de produção, culminado com uma análise crítica do projeto, a qual tem por finalidade avaliar se todas as etapas foram cumpridas de forma adequada.

4.2 Componentes utilizados e ciclos de processamento

4.2.1 Componentes utilizados

Os testes de homologação do forno PADS foram realizados com a utilização de componentes injetados atualmente produzidos pela empresa Steelinject.

As peças utilizadas nos ciclos de processamento foram obtidas segundo parâmetros de processamento padrão para as mesmas. Na tabela 1 é apresentado um resumo das principais características de processamento dos componentes avaliados.

Tabela 1. Características de processamento dos componentes utilizados nos ciclos de homologação

| Aços ao carbono – liga Fe2Ni0,6C | Aço inoxidável- liga AISI 316-L |
|--|--|
| Peça utilizada: trava do pino massa da peça injetada: 19,5 g | Peça utilizada: “esfera de ¼” massa da peça injetada: 14,3 g |
| Pós metálicos utilizados: 1. Ferro carbonila d50: 4 µm 2. Níquel carbonila d50: 4 µm | Pós metálicos utilizados: 1. 316-L atomizado a gás d50: 9 µm 2. 316-L atomizado a água d50: 7 µm |
| Sistema ligante: 8% em massa 1. polímero <i>back bone</i> : PP e EVA 2. plastificante: parafina e amida graxa 3. surfactante: EVA | Sistema ligante: 8,5% em massa 1. polímero <i>back bone</i> : PP e EVA 2. plastificante: parafina e amida graxa 3. surfactante: EVA |
| Mistura da massa de injeção: 180°C, 1 hora | Mistura da massa de injeção: 170°C, 1 hora |
| Temperatura de injeção: 195 °C Pressão de injeção: 85 bar Pressão de recalque: 75 bar | Temperatura de injeção: 175 °C Pressão de injeção: 105 bar Pressão de recalque: 95 bar |
| Extração química de ligantes: 8 horas Eficiência perda de massa prevista: 95–100% | Extração química de ligantes: 16 horas Eficiência perda de massa prevista: 98–100% |

4.2.2 Ciclos de processamento

Os ciclos de processamento foram projetados de acordo com os resultados obtidos previamente no reator piloto do LabMat, em Florianópolis, SC.

A tabela 2 traz uma lista com os parâmetros de processo mensurados e/ou controlados durante os ciclos de processamento do reator PADS. Estes parâmetros são válidos para os ciclos de homologação dos aços ao carbono, bem como dos aços inoxidáveis.

Tabela 2. Parâmetros de processamento disponíveis no reator PADS

| Parâmetros de processo mensurados e controlados | Parâmetros de processo apenas mensurados (informação) |
|--|--|
| Temperatura das zonas de aquecimento (três) | Temperatura da câmara interna |
| Pressão de trabalho | Pressão manométrica |
| Corrente de plasma | Tempo de plasma ligado (T_{on}) |
| Tempo de processo (por passo) | Corrente dos transformadores elétricos (três) |
| Vazão de gás | - |

4.3 Caracterização dos componentes

4.3.1 Caracterização dimensional

A avaliação dimensional dos componentes foi feita com a utilização de dois instrumentos de medição, paquímetro e micrometro, ambos com leitura digital.

A medição foi feita segundo técnica e procedimento de medição para cada um dos equipamentos, onde o metrologista recebe treinamento para a medição dos itens (definidos pela empresa Steelinject).

Basicamente, a medição consiste no apoio de uma das faces de medição da peça desejada sobre uma das duas faces de apoio do instrumento, enquanto que a outra face de

medição do equipamento aproxima-se da outra face de medição do produto, até que as mesmas se encostem (operação manual). A partir do momento em que a peça é fixa no instrumento de medição, o valor é registrado.

A marca e modelo dos equipamentos utilizados foram:

- paquímetro: modelo CD.6” GS Mitutoyo, com resolução de 0,01 mm e erro de medição de $\pm 0,02$ mm;

- micrômetro: modelo 293-521-3 Mitutoyo, com resolução de 0,001 mm e erro de medição de $\pm 0,002$ mm;

4.3.2 Caracterização físico-mecânica

A característica física densidade foi medida através do método de Arquimedes. Este método de medição consiste na relação entre a massa de um componente ao ar e água, onde a massa do componente na água representa o volume de líquido deslocado pelo mesmo.

Através das fórmulas abaixo é possível obter o valor de densidade do produto sinterizado, de forma a avaliar o nível de densificação do mesmo.

Densidade = $(m_{\text{ar}} / \text{volume})$, onde

Volume = $(m_{\text{ar}} - m_{\text{água}}) / \rho_{\text{água}}$.

A medição é feita a partir da verificação da massa da peça ao ar. Após, a mesma é imersa em um recipiente com água deionizada. A temperatura da água é mensurada (em função de sua temperatura), para a obtenção da densidade da água. Após, a partir da utilização de uma seringa com água, as bolhas de ar presentes na superfície do produto sinterizado são eliminadas, e então a peça é disposta em um alojamento conectado a balança (na água), de forma a obter-se o valor da massa na água [19].

Para a medição dos componentes sinterizados foi utilizada uma balança digital modelo Sartorius BP 210 S, com resolução de 0,0001 g e erro de medição de $\pm 0,0001$ g.

A característica mecânica microdureza foi medida através da escala de medição Vickers (HV). Este método de medição é utilizado quando se deseja obter o valor de dureza

do material com a aplicação de baixas cargas, entre 5 e 5000g (através de uma ponteira em formato piramidal em diamante).

Para a tecnologia *PIM*, a escala de 200g (0,2kg) é utilizada, em função da porosidade residual inerente dos sinterizados, a qual pode levar a um erro do valor de dureza da matriz metálica, se a força de aplicação levar em consideração os poros dispersos no volume da peça.

O método consiste na aplicação da carga na matriz metálica durante 15 segundos. Após, as duas diagonais formadas pela incisão da pirâmide são medidas (no plano, um losango). A partir da dimensão das diagonais, o equipamento calcula a microdureza do material, informando no display do equipamento.

O equipamento utilizado para a medição de microdureza Vickers foi um Shimadzu modelo HMV 2000. O padrão de aferição utilizado foi 700 ± 35 HV 0,2 kg. O erro de medição do equipamento (segundo norma ABNT) para cargas de 200g é de ± 5 % sobre o valor mensurado.

A característica química teor de carbono foi avaliada a partir da técnica de cromatografia de massa. Este método consiste na queima do material (amostra) em atmosfera de oxigênio. A partir dos gases de combustão, e conseqüente formação de CO e CO₂ (caso o material possua carbono), o equipamento identifica o teor de carbono do produto, a partir de cálculos estequiométricos, uma vez que a massa da peça é inserida no equipamento de medição (analisador de carbono, ou cromatógrafo de massa).

A partir da verificação da massa do material avaliado (geralmente em torno de 1g), o mesmo é disposto no equipamento, em um cadinho cerâmico. A queima do material ocorre através da passagem de uma corrente elétrica sobre a amostra, que na presença de oxigênio entra em combustão, e os gases de combustão são coletados pelo cromatógrafo, o qual faz a análise dos mesmos e indica o teor de carbono do material avaliado.

O equipamento utilizado para a medição do teor de carbono foi um cromatógrafo Leco WR-112. Os padrões de aferição utilizados foram:

- alto carbono: $0,834 \pm 0,005$ %C em massa – para avaliação do aço ao carbono;
- baixo carbono: $0,0380 \pm 0,0009$ %C em massa – para avaliação do aço inoxidável;

5. Projeto informacional do reator

5.1 Reator em escala piloto

O forno de extração de ligantes e sinterização assistido por plasma (PADS) foi desenvolvido, primeiramente em escala piloto, no laboratório de materiais da UFSC. Para o desenvolvimento do processo, fez-se necessária a obtenção de um equipamento que proporcionasse em um mesmo ambiente de processamento, a utilização de uma descarga de plasma e aquecimento resistivo (sistema híbrido).

A existência do Reator Piloto foi o ponto de partida para a construção do equipamento proposto neste trabalho.

Este primeiro equipamento era composto, anteriormente, de uma câmara hermética em aço inoxidável, o qual continha todo o sistema de plasma já desenvolvido. As macro alterações necessárias para a obtenção de um ambiente híbrido foram:

- introdução de um sistema de aquecimento resistivo;
- alteração do sistema de eletrodos catodo/anodo do reator;
- alteração do sistema de aquisição de dados e controle de processo,

Realizadas as alterações no equipamento (ano 2002), o reator em escala piloto foi utilizado como protótipo para posterior repasse tecnológico à indústria.

O layout de construção, sub-sistemas, materiais empregados e parâmetros de processamento do reator piloto foram utilizados para todas as fases da obtenção do reator de ciclo único em escala industrial.

5.2 Casa da qualidade para o PADS

Primeiramente, seguindo a metodologia de projeto apresentada, foram definidos os clientes para o reator [16]. Entre os clientes, existem os diretos e indiretos.

Entre os clientes diretos, encontram-se aqueles que apresentem benefícios diretos com o equipamento e a tecnologia. São eles:

- Empresa Steelinject (Lupatech S/A): detentora do equipamento e das patentes do processo e equipamento;
- Laboratório de Materiais (UFSC): reconhecimento do estudo realizado com a tecnologia, divulgação do laboratório em âmbito internacional;
- FINEP (governo federal): retorno ao financiamento de tecnologia de ponta destinado ao projeto;

Os clientes indiretos são aqueles que, de alguma forma, beneficiaram-se em algum momento, com o contato com o equipamento. Entre estes:

- professores, alunos de pós-graduação e graduação da UFSC;
- fornecedores de equipamentos, materiais e serviços para a obtenção do equipamento;
- clientes da empresa Steelinject: recebimento de componentes injetados de alta qualidade e preço mais competitivo;

Após a definição dos clientes, foram definidos os requisitos de usuário para o reator. Para uma abordagem mais sistêmica e de maior abrangência (macro visualização do projeto), os requisitos do usuário foram definidos segundo atributos de projeto, apresentados a seguir:

Equipamentos industriais têm por característica uma fácil utilização (operação) e a não necessidade de atuação humana durante o processamento. Por se tratar de um forno do tipo batelada (carga/descarga), o mesmo deve apresentar um fácil carregamento e

descarregamento dos componentes injetados e fácil programação, com uma interface homem-máquina agradável;

A tecnologia *PIM* é utilizada no processamento de vários tipos de materiais. Desta forma, o equipamento deve ser capaz de processar diferentes classes de materiais, como metais, cerâmicos e compósitos. Os lotes de produção devem ser os maiores possíveis, para a produtividade do forno ser elevada. A extração de ligantes deve ser realizada de forma rápida e eficaz, pois a proposta da utilização do plasma sugere uma extração de ligantes mais rápida. As temperaturas de sinterização devem ser elevadas, para o processamento dos materiais citados acima, bem como o aquecimento deve ser controlado para a obtenção de componentes com alta qualidade final. O nível de vazamento do forno deve ser baixo, pois o ambiente de processamento deve ser limpo de forma a processar materiais reativos, como titânio e silício. A descarga de plasma deve ser estável e sem a presença de arcos voltaicos, de forma que o processo seja uniforme. Por se tratar de um equipamento industrial, o mesmo deve ser robusto, ou seja, apresentar uma vida útil de no mínimo dez anos de operação plena.

O equipamento deve apresentar um fácil e rápido acesso aos seus vários subsistemas, bem como fáceis montagem e desmontagem quando da necessidade de manutenção. O índice de problemas e de defeitos deve ser baixo, como sugere um equipamento industrial.

O equipamento deve ser projetado levando-se em consideração sua fabricação em série. Logo, a utilização de componentes seriados se faz justificada. Sua montagem deve ser de fácil operação, de forma que não haja a necessidade de utilização de mão de obra especializada de outros países ou representantes nacionais.

A limpeza do reator deve ser facilitada, para a manutenção de suas características de processamento. O reator deve ocupar a menor área instalada necessária possível, dentro da fábrica.

Por se tratar de um equipamento relativamente grande, a saída dos componentes e sistemas da fábrica (quando de sua necessidade) deve ser feita de modo adequado e simples, sem a necessidade de utilização de equipamentos dedicados.

O custo de fabricação deve ser o menor possível, levando-se em consideração a necessidade de importação de alguns componentes. O equipamento deve apresentar inovação tecnológica a qual possibilite a obtenção de patente internacional para proteção intelectual do desenvolvimento.

A distribuição do layout deve ser limpa e harmoniosa, sugerindo uma impressão de inovação e qualidade do equipamento.

Os riscos relacionados a falhas devem ser os menores possíveis, sugerindo ações preventivas durante a fase de projeto, como: baixo risco de explosão, queimaduras, acidentes e ruído.

A adequação as normas ambientais e de engenharia (projeto e segurança) devem ser respeitadas em todos os aspectos do equipamento.

A conversão dos requisitos de usuário em requisitos de projeto foi feita segundo linguagem de engenharia, levando-se em consideração a posterior definição das especificações de projeto para o reator PADS.

A casa da qualidade, apresentada a seguir na figura 6, identifica, nas linhas, os requisitos de usuário. Nas colunas, os requisitos de projeto (traduzidos dos requisitos de usuários) são listados. A coluna à direita dos requisitos de usuário traz um fator de importância para os mesmos, a qual foi definida levando-se em consideração a experiência e necessidades de uma fábrica *PIM* (Steelinject).

Os relacionamentos entre os requisitos de usuário e de projeto foram definidos segundo:

- forte: 5;

- médio: 3;

- fraco: 1;

Com isso, multiplicou-se, para cada requisito de projeto, o seu valor definido no relacionamento entre os requisitos (5, 3 ou 1) pelo fator de importância de cada requisito de usuário (coluna à direita). Após, somaram-se, verticalmente, os valores obtidos, definindo assim o valor final para cada requisito de projeto.

Após o inter-relacionamento entre os requisitos de usuário e de projeto, foi definida a ordem de valoração para cada requisito de projeto, que define àqueles mais importantes do equipamento, de acordo com os valores determinados.

A partir do ordenamento, definido por ordem de valor, cada requisito de projeto foi traduzido em uma especificação de projeto.

Esta especificação define uma característica importante para o projeto do reator, e estas vão é nortear todo o projeto, nas fases seguintes. A apresentação das especificações de projeto á feita segundo a ordem de valor, definida no relacionamento da casa da qualidade (tabela 3).

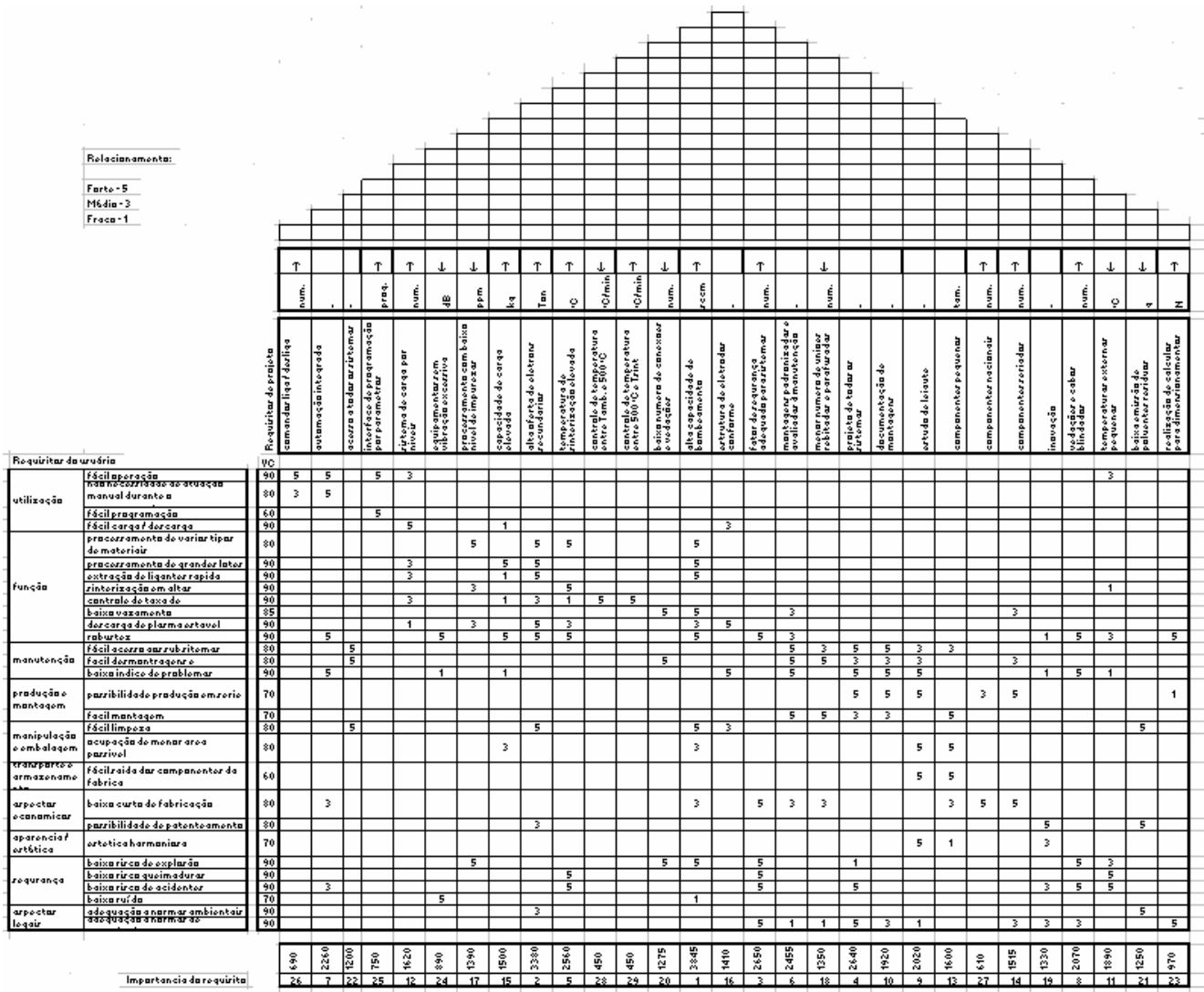


Figura 6. Casa da qualidade para o reator PADS

5.3 Especificações de projeto para o PADS

Tabela 3. Especificações de processo para o reator PADS.

| Nº. | Especificação de projeto | objetivo | sensor | Saída indesejável | observações |
|-----|--|--|--|---|---|
| 1 | alta capacidade de bombeamento | Obter baixa pressão com alto volume de gás inserido na câmara | Baratron e válvula reguladora de pressão | pressão acima de 1 Torr com 20000 sccm de H ₂ + vapor de polímero | possibilitar processamento de lotes acima de 35 kg de componentes injetados |
| 2 | alta oferta de elétrons secundários | bombardear todo o polímero proveniente da carga de peças processadas | Visual | Depósito de borra polimérica nas bombas de vácuo ou outras partes do sistema de vácuo | |
| 3 | fator de segurança adequado para os sistemas | evitar problemas com dimensionamento de componentes | funcionamento adequado | acidentes e paradas para modificação de projeto | |
| 4 | projeto de todos os sistemas | documentar e avaliar todo o processo de fabricação do equipamento | documentação | erro de funcionamento por falta de avaliação na fase de projeto | |
| 5 | temperatura de sinterização elevada | sinterizar ligas de alta estabilidade de óxidos como Ti e aços inoxidáveis | termopar | baixa densificação por falta de temperatura de sinterização | T _{máx} de trabalho: 1450 °C |
| 6 | montagens padronizadas e avaliadas quanto a manutenção | facilitar montagem e favorecer manutenção | juízo | montagem inviável e difícil acesso para manutenção | |
| 7 | automação integrada | evitar que o operador opere o equipamento durante o processo | juízo | operação manual de qualquer parâmetro durante o processo | código aberto (software) de posse da empresa |
| 8 | vedações e cabos blindados | evitar acidentes de explosões e choques | engenharia de segurança do trabalho | acidentes e paradas para modificação de projeto | |
| 9 | estudo do leiaute | ocupar menor área útil possível da fábrica | área disponível para o equipamento | leiaute ruim e falta de espaço | |
| 10 | documentação das montagens | ter o processo de montagem documentado para comercialização do forno | documentação | perda de histórico de montagem | |
| 11 | temperaturas externas baixas | evitar acidentes como queimaduras | engenharia de segurança do trabalho | acidentes e paradas para modificação de | |

| | | | | | |
|----|---|---|---|--|--|
| | | | | projeto | |
| 12 | sistema de carga por níveis | facilitar processo de carga e descarga de peças no forno | juízo | tempo elevado para carga / descarga, bem como quebra e queda de peças | |
| 13 | componentes pequenos | facilitar saída dos mesmos da fábrica para manutenção ou descarte | área das saídas da fábrica | não retirada de um equipamento da fábrica e necessidade de redução por ação mecânica (corte) | |
| 14 | componentes seriados | facilitar os processos de compra e montagem dos sistemas | preço e prazo de entrega e tempo de montagem | projetar componentes complexos e de custo elevado, bem como despendendo grandes tempos com acertos na montagem | |
| 15 | capacidade de carga elevada | processar a maior quantidade possível de componentes no reator, de forma que o plasma opere sem problemas | qualidade das peças processadas | peças não - conforme | |
| 16 | estrutura de eletrodos conforme | evitar problemas de manutenibilidade de descarga de plasma devido a geometria dos eletrodos | quantidade de arcos | extinção de descarga por abertura de arcos intermitentes | |
| 17 | atmosfera de processamento com baixo nível de impurezas | processar ligas metálicas de alta estabilidade de óxidos | vácuo final e qualidade dos produtos sinterizados | peças oxidadas devido entrada de O2 durante o processamento | |
| 18 | menor número possível de uniões parafusadas e rebitas | facilitar manutenção quando da desmontagem de uniões | juízo | quebras de parafusos, porcas e chapas de metais refratários como Mo | |
| 19 | inovação | depositar patente internacional com o novo equipamento | depósito de patente e ganho com <i>royalties</i> | inviabilização de patente | |
| 20 | baixo número de conexões e vedações | evitar vazamentos e problemas com oxidação | vácuo final e taxa de vazamento | peças oxidadas e vácuo final inadequado na partida do equipamento | |

| | | | | | |
|----|--|---|---------------------------------------|--|--|
| 21 | baixa emissão de poluentes e resíduos | manter o equipamento limpo e ambiente conforme leis ambientais | visual e legislação ambiental | borra de polímeros e emissão de gases tóxicos | |
| 22 | acesso a todos os sistemas | facilitar limpeza e manutenção do equipamento | juízo | limpeza dificultada e difícil acesso a manutenção aos componentes | |
| 23 | realização de cálculos para dimensionamento | evitar problemas de falha por falta de dimensionamento ou incorretos | funcionamento do equipamento | falha e / ou alteração do projeto | |
| 24 | equipamentos sem vibração excessiva | reduzir níveis de ruídos e vibrações | audição e integridade dos componentes | ruído acima de 50 dB e falha por desbalanceamento de componentes | |
| 25 | interface de programação por parâmetros | facilitar processo de programação de ciclos | juízo | não haver pessoas apenas que saibam programar os ciclos de processamento | |
| 26 | comandos liga / desliga | automação e menor grau de ação humana no equipamento | juízo | manipulação do equipamento e regulagens manuais durante o processamento | |
| 27 | componentes nacionais | evitar importações e longos prazos de entrega, bem como maior custo dos componentes | custo e prazo de entrega | elevados custos com importações e atraso na entrega dos componentes | há equipamentos somente importados - ter reserva |
| 28 | controle de temperatura entre $T_{amb.}$ e 500 °C | controlar a taxa de aquecimento adequadamente na etapa de extração de ligantes | controle de temperatura do CLP | gradiente de temperatura acima de ± 5 °C | auxílio de controlador tipo PID |
| 29 | controle de temperatura entre 500 °C e $T_{sint.}$ | controlar a taxa de aquecimento adequadamente na etapa de sinterização | controle de temperatura do CLP | gradiente de temperatura acima de ± 5 °C | |

A seguir, as especificações de projeto são discutidas quanto as suas características, necessárias ao bom desempenho do equipamento.

1. Bombas de vácuo caracterizam-se pela baixa vazão em baixas pressões. Como a pressão de trabalho utilizada no reator é baixa (~ 1 Torr), e a quantidade de gases gerados durante a etapa de extração de ligantes é elevada (hidrocarbonetos devido a degradação dos polímeros mais o gás de processo hidrogênio), o sistema de bombeamento deve ser dimensionado de forma que a pressão do sistema não se eleve nesta etapa, pois se assim for, a característica da descarga de plasma é alterada, o que prejudica o processo de extração de ligantes.

2. A geração de espécies reativas (íons e elétrons secundários) deve ser suficientemente alta, de forma que o polímero seja bombardeado pelas mesmas, provocando a quebra das cadeias de carbono presentes nos ligantes. Para isso, o dimensionamento dos eletrodos catodo e anodo, bem como da fonte de potência de plasma deve ser realizado levando-se em consideração o aspecto da potência de plasma instalada, ou seja, a quantidade de espécies reativas disponível para a quantidade de peças (mensurada em kg) a ser processada no equipamento.

3. Quando do dimensionamento dos sistemas (principalmente mecânicos e elétricos), o fator de segurança a ser utilizado deve ser adequado, de forma que o mesmo não provoque riscos de acidentes durante o seu funcionamento.

4. O projeto dos sistemas presentes no reator, de forma objetiva e documentada, evita problemas futuros com manutenção e novas construções, pois assim permite a rápida visualização das informações necessárias para determinado objetivo.

5. A temperatura de sinterização deve ser elevada de forma que seja possível sinterizar ligas metálicas e algumas ligas cerâmicas. Usualmente, fornos a vácuo projetados para a tecnologia *PIM* trabalham em temperaturas de até 1450 °C, temperatura esta suficiente para sinterizar ligas ferrosas, aços inoxidáveis, ligas magnéticas e algumas ligas cerâmicas.

6. A padronização de montagens possibilita uma manutenção rápida e mais econômica, pois permite o fácil acesso e desmontagem dos componentes, bem como evita a fabricação de componentes customizados, o que agrega custo e tempo.

7. A operacionalidade do equipamento deve ser totalmente automática, sem a intervenção humana durante o processamento. Isto se faz necessário, pois fornos utilizados na produção de componentes *PIM* devem ser apenas monitorados, e não operados durante o processamento, já que os mesmos trabalham 24 horas por dia.

8. As vedações devem ser estanques, de forma que não haja riscos de acidentes com explosão (já que o equipamento trabalha com hidrogênio e descarga elétrica), como também problemas no processamento de ligas termodinamicamente estáveis quanto a sua formação de óxidos. Cabos elétricos devem ser blindados, também para evitar o risco com explosões.

9. O leiaute do equipamento deve ser harmonioso e eficiente, de forma que o aspecto visual seja agradável, para credibilidade da tecnologia (objetivando repasse industrial). A eficiência está relacionada ao espaço físico instalado necessário. A menor área útil da fábrica deve ser ocupada.

10. Da mesma forma que no item 6, as montagens devem documentadas, para fácil manutenção e consulta para novas construções.

11. As temperaturas externas devem ser as menores possíveis, para evitar riscos de acidentes com queimaduras. Como a temperatura interna do forno, na etapa de sinterização, será elevada, e não há a possibilidade de se trabalhar com fibra cerâmica (devido ao baixo ponto de orvalho necessário), a blindagem térmica e os flanges devem ter uma transferência de calor adequada para que a temperatura externa não exceda 50 °C.

12. O carregamento com as peças deve ser facilitado, logo o sistema de carregamento por níveis é o mais rápido e eficiente. Pelo fato da estrutura de eletrodos ser utilizada como “prateleiras” para carregamento de peças, esta técnica facilita o projeto e a construção dos eletrodos.

13. Os componentes devem ser pequenos, ou encaixáveis, de forma que a entrada e saídas dos mesmos da fábrica seja prático, evitando a utilização de equipamentos de grande porte para sua movimentação.

14. A utilização de componentes seriados é importante pela questão custo (que deve ser minimizada), como também pela questão montagem e manutenção, pois assim estas operações são facilitadas e possíveis de serem executadas por pessoal de mão de obra não especializada.

15. A capacidade de carga a ser processada deve ser a maior possível, de forma que a produtividade do equipamento seja maximizada. Basicamente, a quantidade de carga a ser processada depende de três fatores: sistema de eletrodos (quantidade de peças dispostas sobre o mesmo), capacidade de bombeamento do sistema de vácuo e potência de plasma instalada para o processamento na etapa de extração de ligantes.

16. A estabilidade dimensional e térmica da estrutura catodo / ânodo deve ser elevada, de forma que a presença de arcos voltaicos seja minimizada (ideal isenta). Os arcos voltaicos provocam instabilidade na descarga de plasma, o que prejudica a etapa de extração de ligantes.

17. O processamento de ligas termodinamicamente estáveis quanto à formação de óxidos deve ser possibilitado. Para isto, uma baixa concentração de impurezas, como O, C, N e outros elementos se faz necessário. Com isso, um sistema estanque (sem vazamentos) e limpo é desejável.

18. Uniões parafusadas e rebitadas geram dificuldade de desmontagem, quando de seu trabalho em alta temperatura (caso deste reator). Desta forma, fixações desta natureza devem ser evitadas quando possível.

19. O reator deve apresentar inovação tecnológica, de forma a possibilitar a patente da tecnologia, interesse este da empresa Lupatech S/A, financiadora deste projeto, em parceria com a Finep.

20. Conexões e vedações são potenciais riscos de vazamento, e estes devem ser evitados. Assim, quanto menor for o número de conexões e vedações, menor o risco de vazamentos no equipamento.

21. A baixa emissão de poluentes e resíduos é uma tendência para a tecnologia do plasma. A questão ambiental deve ser avaliada, logo, quanto o menor o n°. de partículas poluentes, mais correto ecologicamente o equipamento será.

22. O acesso facilitado aos sistemas do equipamento permite fácil limpeza e manutenção, quando de sua necessidade. Desta forma, este item deve ser considerado quando do projeto dos sub-sistemas do reator.

23. O dimensionamento sem cálculos (baseado na experiência) pode trazer riscos de segurança como também retrabalhos após lançamento do equipamento, o que acarreta prejuízos e riscos. Assim, o cálculo detalhado dos dimensionamentos é importante para que não haja problemas após a homologação do equipamento.

24. Vibrações provocam ruídos e problemas ao funcionamento do equipamento, devido a movimentação das peças durante o processamento, possibilitando perda de forma dos componentes injetados. Isolamentos destas vibrações devem ser considerados, como no sistema de vácuo, transformadores, movimentação do reator, entre outros.

25. A programação de ciclos de processamento deve ser facilitada, sem a necessidade da utilização de manuais extremamente complexos, e se possível em língua portuguesa, pois desta forma facilita a utilização do mesmo pelos colaboradores da fábrica. As telas de programação devem ser limpas e práticas quanto a sua programação.

26. A inicialização de ciclos deve ser feita a partir de comandos do tipo liga/desliga, de forma que todas as rotinas sejam feitas de forma automática, tornando o equipamento simples e de fácil operação.

27. Na medida do possível, componentes nacionais devem ser utilizados, o que promove menor custo de aquisição (devido taxa cambial), menor prazo de entrega, fácil e rápido contato e assistência técnica, bem como reposição.

28. A taxa de aquecimento, na etapa de extração de ligantes (T_{amb} a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$), deve ser controlada de forma adequada, sem a presença de aquecimentos descontrolados, pois estes promovem problemas como distorções no injetado, devido a saída repentina de uma grande quantidade de polímero do injetado.

29. A taxa de aquecimento, na etapa de sinterização ($500\text{ }^{\circ}\text{C}$ a T_{sint}), deve ser controlada de forma adequada, tanto quanto na etapa de extração de ligantes, pelo mesmo motivo, porém, não pela saída de polímero, mas sim devido a força da gravidade, aliado as altas temperaturas, As quais promovem distorções no injetado.

6. Projeto conceitual do reator

6.1 Estrutura funcional do PADS

A partir da definição das especificações do projeto, o passo seguinte é realizar uma análise detalhada da função macro do produto, e, desmembrar o produto em sub-sistemas (também conhecido como funções parciais de 1ª e 2ª ordens).

A definição das funções parciais do equipamento é realizada de acordo com a experiência e necessidades de um equipamento para processamento de materiais por plasma, bem como de fornos resistivos.

A partir das entradas e saídas define-se o ambiente de processamento (reator PADS). Para as funções parciais, o desdobramento é interrompido na 2ª ordem, pois um detalhamento mais extenso é feito na matriz morfológica, etapa seguinte a estrutura funcional.

A estrutura funcional do reator PADS é apresentada na figura 7.

| | | | | |
|------------------------|---|--|---|--------------------------|
| lote de peças injetado | → | reator híbrido plasma - resistores elétricos | → | lote de peça sinterizado |
|------------------------|---|--|---|--------------------------|

| <i>Funções parciais de 1ª ordem</i> | sistema de vácuo | sistema de gases | sistema de aquecimento | sistema de descarga de plasma | sistema de resfriamento | sistema de movimentação | sistema de controle | sistema estrutural |
|-------------------------------------|---------------------|------------------------|--|---------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--|
| <i>Funções parciais de 2ª ordem</i> | bombeamento | controle da vazão | projeto do sistema térmico | extração de ligantes por plasma | remoção do calor das partes quentes | subir / descer camara superior | aquisição e tratamento dos sinais | leiaute e distribuição dos componentes |
| | controle da pressão | distribuição na camara | aporte de calor ao volume útil da camara | sinterização por plasma | resfriamento forçado | movimentação dos cabos e fios | operação e monitoramento | segurança |

Figura 7. Estrutura funcional do reator PADS

6.2 Descrição da análise funcional

A análise funcional é uma descrição da estrutura funcional, ou seja, uma descrição brevemente detalhada dos sub-sistemas do equipamento, de forma que esta orienta as etapas seguintes do projeto.

- Sistema de Vácuo

O sistema de vácuo apresenta três funções principais: obtenção de uma pressão negativa (vácuo), bombeamento dos gases de processo e manutenção de uma atmosfera limpa (sem impurezas). Estas necessidades são obtidas utilizando-se um sistema de bombas de vácuo, um sensor de pressão, uma válvula reguladora de pressão, tubulações e vedações adequadas. O dimensionamento do sistema de vácuo deve ser realizado de acordo com o volume da câmara e quantidade de gases a serem bombeados em uma pressão de trabalho desejada. Este controle de pressão é exercido por meio de uma válvula controladora de pressão servo-assistida, que trabalha com perda de carga para controle da pressão.

- Sistema de Gases

Os gases de processo são fundamentais para as reações de interesse durante o processamento dos materiais no reator. A vazão dos mesmos (quantidade inserida por unidade de tempo) no equipamento é fundamental para o controle destas reações, bem como a forma como o mesmo é distribuído na câmara. Usualmente, a utilização de um difusor de gás (*plenum*) é mais eficiente, no sentido de homogeneizar o fluxo de gás ao longo do volume útil de trabalho.

- Sistema de Aquecimento

A quantidade de calor a ser aportada em um ambiente de processamento depende da massa a ser aquecida no volume útil de trabalho, temperatura de processamento e de suas perdas térmicas. Basicamente, fornos a vácuo trabalham com resistências de metal refratário ou grafite. A mufla térmica deve evitar a perda de calor. Um sistema de transformadores e de

controladores de potência é necessário para prover a corrente elétrica de forma adequada para a dissipação de calor por efeito Joule nos resistores elétricos. Embora um dos efeitos da descarga de plasma seja a geração de calor, o equipamento necessita de aquecimento auxiliar resistivo para poder ajustar os parâmetros de plasma àqueles valores mais adequados para a ativação das reações pretendidas. Assim, as temperaturas de processamento são controladas de forma independente, pelo sistema de aquecimento resistivo, que gera a quantidade de calor requerida.

- Sistema de descarga de plasma

O ambiente de processamento de materiais por plasma é composto de dois eletrodos: catodo e anodo. Estes eletrodos devem ser dispostos no ambiente de tal forma que a descarga de plasma formada entre estes se dê de forma homogênea e sem instabilidades (arcos voltaicos). A geometria dos eletrodos é fundamental para estes requisitos, de forma que a rigidez estrutural do material dos eletrodos, método de fabricação e fixação dos mesmos são fundamentais. A fonte de plasma é necessária para a geração do pulso de corrente modulada, bem como da frequência destes pulsos para o processamento dos materiais.

- Sistema de Resfriamento

Por se tratar de um forno industrial, os tempos de processo devem ser reduzidos, e o equipamento deve apresentar temperaturas baixas em suas partes externas. Desta forma, um sistema de resfriamento forçado (em ciclo fechado) é fundamental para um rápido resfriamento desde a temperatura de sinterização até temperaturas adequadas para a abertura do equipamento. Também, a utilização de sistemas de trocadores de calor para as diversas partes quentes do forno se justifica, de forma a manter uma temperatura máxima admissível nas áreas externas.

- Sistema de Movimentação

O leiaute do forno sugere que o mesmo seja operado na direção vertical, de forma a facilitar o carregamento e descarregamento das peças, devido as características intrínsecas do plasma. Assim, um sistema de movimentação (elevação) para o forno se faz necessário. Usualmente, a utilização de elevadores e talhas é empregada com êxito. Partes móveis devem ser contempladas durante a movimentação do reator (cabos, fios e outros).

- Sistema de Controle

A aquisição e tratamento dos sinais de controle e monitoramento do processo são fundamentais para o sucesso do processamento dos produtos no equipamento. Para isso, um moderno, porém simples sistema de controle deve ser empregado. Controles como temperatura, potência de plasma, tempos, pressão, vazão de gás e eventos devem ser realizados de forma adequada e robusta, sem a interferência da ação humana durante o processamento. Para isso, sensores de elevada tecnologia e controladores modernos devem ser utilizados.

- Sistema Estrutural

O dimensionamento dos componentes mecânicos, elétricos e eletrônicos deve ser feito de tal forma que a robustez seja suficientemente adequada para garantir o perfeito funcionamento do equipamento, sem a ocorrência de riscos de acidentes, manutenções periódicas excessivas e mudanças de projeto após conclusão do equipamento. Para isso, um dimensionamento adequado e detalhado é importante para atendimento deste objetivo tão importante. O leiaute deve ser adequado e funcional.

6.3 Obtenção da matriz morfológica do PADS

A matriz morfológica do reator PADS foi obtida levando-se em consideração as especificações de projeto e análise funcional, como também do projeto do reator em escala piloto, presente no LabMat (UFSC), e de um forno a vácuo existente na empresa Steelinject Ltda. – Lupatech S/A.

Assim, apenas uma solução foi definida, otimizando aspectos que poderiam ser melhorados em relação aos equipamentos já existentes. A participação de uma equipe de engenharia da empresa Lupatech S/A e do LabMat (UFSC) auxiliou no processo de solução da alternativa para o projeto dos sistemas do reator.

A matriz morfológica do reator PADS está apresentada na figura 8.

A alternativa de projeto foi tomada após reuniões e discussões com os membros envolvidos no projeto do reator PADS, tanto da empresa Lupatech S/A como do LabMat (UFSC).

Modificações baseadas no projeto do sistema piloto foram realizadas, devido ao dimensionamento do sistema industrial ser maior.

A matriz morfológica apresentada traz para cada sistema do reator (função parcial de 2ª ordem), os componentes necessários para o desempenho da função de cada um destes sistemas.

| <i>Funções parciais de 1ª ordem</i> | sistema de vácuo | sistema de gases | sistema de aquecimento | sistema de descarga de plasma | sistema de resfriamento | sistema de movimentação | sistema de controle | sistema estrutural | |
|--|-------------------------|------------------------|--|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--|--|--------------------------------------|
| <i>Funções parciais de 2ª ordem</i> | bombeamento | controle da vazão | projeto do sistema térmico | extração de ligantes por plasma | remoção do calor das partes quentes | subir / descer camara superior | aquisição e tratamento dos sinais | leiaute e distribuição dos componentes | |
| | controle da pressão | distribuição na camara | aporte de calor ao volume útil da camara | sinterização por plasma | resfriamento forçado | movimentação dos cabos e fios | operação e monitoramento | segurança | |
| <i>Alternativa de projeto e construção</i> | bomba de vacuo mecanica | cilindros com gases | resistores eletricos | eletrodos catodo e anodo | camisas d'água | eleva-car | sensor de pressão de membrana capacitiva | camara superior | |
| | bomba de vacuo roots | | passadores de energia | | flanges de resfriamento | | termopares | camara inferior | |
| | trap | | isoladores eletricos | passador de energia | | | sensor de pressão | flanges | |
| | valvula gaveta | tubução para gases | barramento de energia | isoladores eletricos | tubulações de água | | pinos guia | | controladores de processo universais |
| | tubulação | | cabos eletricos | | fonte de plasma | torre de arrefecimento | | tela touch-screen | |
| | reductor de vibrações | plenum | chaves contadoras | transformador isolador | ventilador | modulos de potencia (tiristores) | | suporte de bombas | |
| | conexões e vedações | | transformadores eletricos | | passadores de água | chave fim de curso | valvula controladora de pressão | pés de fixação do reator | |
| | conexões e vedações | | conexões e vedações | blindagens termicas | | | janela de visualização | trocadores de calor | cabearamento, fiações e condutes |
| | | | | | | | | alarmes | suporte das blindagens |
| | | | | | | | | programa de controle de processo | |

Figura 8. Matriz morfológica do reator PADS.

A discussão da alternativa gerada para cada sistema presente na matriz morfológica do reator PADS é feita a seguir.

- Sistema de Vácuo

1. Bomba de vácuo mecânica: esta bomba tem a característica de alta vazão mássica e baixa velocidade de deslocamento. Esta bomba é responsável pela retirada do grande volume de ar no início do processo, quando da obtenção do vácuo.

2. Bomba de vácuo roots: esta bomba caracteriza-se pela alta velocidade de deslocamento, porém baixa vazão mássica. Desta forma, esta segunda bomba é utilizada para a obtenção do vácuo final (da ordem de 0,010 Torr), bem como da manutenibilidade da pressão requerida quando da introdução dos gases de processo.

3. Trap: este equipamento tem por objetivo reter pequenas partículas de polímero, no estado sólido, que por ventura venham a se condensar no reator, antes de sua passagem pelas bombas de vácuo, caso este polímero não seja suficientemente bombardeado pelas espécies reativas do plasma. Para evitar danos ao sistema de vácuo, este coletor de resíduos é colocado antes do sistema de bombeamento.

4. Válvula gaveta: esta válvula tem por objetivo manter a estanqueidade do reator quando do não funcionamento do sistema de vácuo. Também, para possíveis quedas de energia, esta é fechada por acionamento pneumático, garantindo a estanqueidade do reator.

5. Tubulação: A tubulação, de aço deve ser projetada com o menor comprimento possível, bem como com a menor quantidade de curvas, de forma que a perda de carga seja a menor possível, como também não redução da performance do sistema de vácuo.

6. Redutor de vibrações: esta tubulação em formato de “sanfona” é colocada entre o sistema de vácuo e o *trap*, de forma a reduzir o nível de vibrações no reator, evitando danos nas peças injetadas.

7. Conexões e vedações: as conexões e vedações devem ser feitas com a utilização de flanges de ótima planicidade e anéis *o’rings*, para que o nível de vazamento seja o menor possível.

- Sistema de Gases

1. Cilindros com gases: como a empresa Lupatech S/A possui uma central com gases de processo (H_2 , N_2 e Ar), esta será utilizada para o fornecimento dos gases de processo requeridos.

2. Tubulação para gases: a tubulação para os gases é feita a partir de cobre, sem conexões, de forma que a pureza dos gases seja mantida em níveis admissíveis para o bom desempenho do processo.

3. Plenum: também conhecido com difusor de gás, deve ser dimensionado de forma que o gás seja inserido na câmara hermética de forma uniforme, proporcionando uma descarga de plasma homogênea e processamento uniforme em todo o volume útil de trabalho.

4. Conexões e vedações: estas peças devem ser feitas em metal, do tipo tubo e anilha, para evitar vazamentos.

- Sistema de Aquecimento

1. Resistores elétricos: os elementos resistivos devem suportar as elevadas temperaturas de sinterização, em uma atmosfera redutora, logo, o material dos mesmos deve ser de elevada resistência. Molibdênio (e suas ligas) é um elemento químico muito utilizado para esta aplicação em fornos a vácuo.

2. Passadores de energia: o dimensionamento deste componente é fundamental para evitar o aquecimento demasiado do mesmo, o que pode provocar uma perda por resistência elétrica, prejudicando o aquecimento das resistências, como também superaquecimento deste item e das vedações.

3. Isoladores elétricos: para não haver curtos-circuitos entre os resistores e o restante do equipamento, isoladores cerâmicos devem ser utilizados. Devido as altas temperaturas, o material mais indicado é cerâmica de alta densidade (alumina, por exemplo).

4. Barramento de energia: o transporte da corrente elétrica dos cabos para os passadores de energia deve ser feito através de barras de metal. O material mais utilizado para esta aplicação é o cobre, e seu dimensionamento é importante para o bom funcionamento do sistema.

5. Cabos elétricos: a passagem da corrente elétrica, dos transformadores até as barras de energia é feita a partir de cabos elétricos, devido a movimentação da câmara do forno. O correto dimensionamento destes cabos é fundamental para evitar perdas e aquecimento elevado nos mesmos, o que leva a perda de performance dos mesmos.

6. Chaves contatoras: estas chaves são acionadas quando do acionamento feito a partir do sinal elétrico, para os transformadores (segurança). O dimensionamento das mesmas é fundamental para evitar riscos com sobrecargas e curtos-circuitos.

7. Transformadores elétricos: a fonte de potência para as resistências elétricas é feita a partir de transformadores elétricos. O nível de tensão e corrente requeridos deve ser bem dimensionado (a partir da transformação da tensão e de corrente do núcleo primário para o núcleo secundário do transformador). Problemas com sinais harmônicos e sincronismo entre fases devem ser levados em consideração no projeto dos mesmos.

8. Blindagens térmicas: o sistema de isolamento térmico da região de trabalho, também conhecido como mufla térmica, deve ser dimensionado de forma que a temperatura externa da mesma seja a menor possível. O cálculo de transferência de calor radiante deve ser avaliado. Materiais de alta resistência a fluência, alta refletividade e baixa emissividade são adequados para esta finalidade.

- Sistema de descarga de plasma

1. Eletrodos catodo e anodo: estes eletrodos são essências para a geração da descarga de plasma, bem como do suporte das peças para o processamento das mesmas. A resistência mecânica em elevadas temperaturas deve ser alta, bem como sua geometria deve evitar a geração de arcos voltaicos.

2. Passador de energia: a passagem da corrente de plasma deve ser feita sem a geração de arcos com o restante do equipamento, ao longo do passador. Logo, seu projeto deve levar em consideração esta característica.

3. Isoladores elétricos: para evitar curtos-circuitos com a carcaça, o isolamento elétrico do passador e do catodo deve ser eficiente, a partir de elementos cerâmicos isolantes.

4. Fonte de plasma: a forma da onda e a frequência do sinal elétrico do plasma devem ser adequados. Para isso, a utilização de uma fonte de plasma bem dimensionada e com características de bom controle de processo deve ser considerado.

5. Transformador isolador: o sinal elétrico do plasma deve ser isolado do restante da rede elétrica do reator, para evitar oscilações do plasma e da rede resistiva. Caso haja interferência na corrente do plasma, a queima de equipamentos eletrônicos é praticamente certa.

6. Janela de visualização: a visualização da descarga do plasma é essencial para o monitoramento do processo. Desta forma, uma janela feita a partir de flange, vedação e vidro (quartzo) é utilizada para esta finalidade.

- Sistema de Resfriamento

1. Camisas d'água: a refrigeração da câmara do reator é importante para a segurança durante a operação do equipamento. A retirada do calor com água é muito utilizada para este tipo de equipamento.

2. Flanges de resfriamento: em passagens de corrente elétrica onde o aquecimento é inevitável (por condução a partir da zona quente), a vedação deve suportar as temperaturas atingidas. Para isto, flanges com resfriamento a partir de água são utilizados.

3. Tubulações de água: o arrefecimento destas regiões quentes depende do dimensionamento da vazão de água da rede. Para isto, tubulações de água devem ser dimensionadas de forma adequada.

4. Torre de arrefecimento: este equipamento é fundamental para a troca de calor gerada pelo aquecimento da água. O sistema de arrefecimento da empresa Steelinject Ltda. – Lupatech S/A foi utilizado.

5. Ventilador: por se tratar de um equipamento de nível industrial, o tempo de resfriamento deve ser o menor possível. Para isso, um sistema de troca de calor em circuito fechado será utilizado. A partir do insuflamento de argônio até a pressão atmosférica, este provocará a retirada de calor do forno. O gás, uma vez aquecido, será retirado do forno, e após seu resfriamento, retornará ao equipamento, frio. A movimentação do gás neste circuito fechado é feito a partir de um ventilador hermético.

6. Passadores de água: os passadores de energia, devido ao seu aquecimento, possuem, em fornos a vácuo, passadores de água em seu interior. A partir da furação no centro da barra circular, um circuito de passagem de água é feito para retirar calor da mesma, evitando que o calor chegue às vedações, prejudicando a vedação do sistema.

7. Trocadores de calor: no sistema de troca de calor do circuito fechado do reator, o resfriamento do gás aquecido é feito a partir de trocadores de calor do tipo casca e tubos, em contra corrente. O dimensionamento dos mesmos deve ser feito de acordo com a temperatura inicial e final do sistema, vazão de gás e tempo desejado para o resfriamento.

8. Difusores de gás: durante o preenchimento da câmara do reator com gás argônio, este deve chegar à zona de trabalho para a retirada do calor da zona quente. Para isso, um sistema de entrada de gás deve existir para o alcance do mesmo na zona quente do forno.

- Sistema de Movimentação:

1. Eleva-car: a movimentação da câmara superior do forno será feita a partir de um elevador de carro. O sistema, por ser comercial, é de fácil aquisição e adaptação para a necessidade desejada.

2. Pinos guia: estes pinos tem a função de, quando da movimentação do reator, evitar o seu “balanço”, fazendo com que o mesmo se movimente sempre de forma alinhada e sem solavancos.

3. Chave fim de curso: esta chave tem por objetivo evitar que o equipamento se eleve além do curso máximo definido, o que pode danificar outros equipamentos. Esta chave é acionada por um sensor elétrico necessário.

4. Cabeamento, fiações e conduítes: os cabos elétricos, de sensores, fios e conduítes presentes devem se movimentar livremente, uma vez que a câmara do reator também se movimenta. Como estes itens estão fixos nesta parte móvel, o seu dimensionamento (comprimento) deve levar em consideração esta movimentação.

- Sistema de Controle:

1. Sensor de pressão de membrana capacitiva: este sensor tem por finalidade enviar o sinal de pressão da câmara para o CLP, que por sua vez emite o sinal elétrico para a válvula reguladora de pressão, a qual corrige, instantaneamente, a pressão desejada no reator.

2. Termopares: estes sensores de temperatura têm por finalidade emitir o sinal de temperatura do sistema para o CLP. Desta forma, o mesmo envia o sinal para os tiristores, que liberam a corrente elétrica necessária para o aquecimento controlado do forno.

3. Sensor de pressão: este segundo sensor de pressão é utilizado para pressões acima de 100 Torr, sendo utilizado para a etapa de resfriamento forçado, quando o mesmo emite o sinal de pressão para o CLP, que comanda o acionamento do ventilador e controle da entrada de argônio para manutenibilidade da pressão desejada durante esta etapa.

4. Sensor Hall: este sensor mede o valor de corrente pulsada da fonte de plasma. Este sinal é enviado ao CLP, que emite um outro sinal elétrico para a fonte de plasma, com o objetivo de controlar a corrente de plasma necessária para o processamento dos componentes.

5. Fluxímetros de gases: estes equipamentos são válvulas servo-assistidas, ou seja, válvulas que a partir de um sinal elétrico enviado por um CLP, liberam a vazão de gás desejada, a partir de um sinal elétrico.

6. Controladores de processo universais: estes equipamentos são utilizados como controladores do processo de aquecimento do forno. Estes são utilizados para esta função, ao invés do CLP, por possuírem um controle de processo do tipo PID (proporcional, integral e derivativo) auto-ajustável, o que facilita o processo de aquecimento, segundo as taxas de aquecimento desejadas.

7. CLP: este equipamento é o controlador de processo utilizado (controlador lógico programável). Este trabalha com sinais, analógicos e digitais, a partir de entradas e saídas. Sua programação é feita a partir de linguagem de programação própria, com a utilização de blocos lógicos, que são definidos segundo a necessidade do processo.

8. Tela *touch-screen*: também conhecida como interface homem-máquina (IHM), é a tela onde o operador interage com o sistema, a partir de toques com os dedos. A partir desta tela, o operador dá início ao processo, visualiza parâmetros e faz a programação de ciclos.

9. Módulos de potência (tiristores): estes equipamentos são utilizados para o controle da liberação de potência para os transformadores elétricos. Os tiristores são feitos a partir de materiais semicondutores, que, através do recebimento de um sinal elétrico, emitem um outro sinal elétrico proporcional (4 a 20mA) para o transformador, que libera a potência para os resistores, em forma de percentual, de 0 a 100 %.

10. Válvula controladora de pressão: esta válvula, servo-assistida, recebe o sinal do CLP e ajusta-se, mecanicamente, de forma a proporcionar a perda de carga necessária para equilibrar a pressão do forno conforme o valor de pressão desejado.

11. Válvula de gás acionada por relé: estas válvulas são dispostas antes dos fluxímetros, e quando do sinal elétrico emitido pelo CLP, estas ligam, liberando a passagem do gás até o fluxímetro, já que estas não são totalmente estanques.

12. Controladores de corrente: também conhecidos como TC's (transdutores de corrente), estes fazem a leitura de corrente que passa pelos cabos do transformador, de forma a possibilitar o monitoramento da corrente de trabalho durante o processo.

13. Alarmes: os alarmes são utilizados para comunicar, visual ou auditivamente, eventuais problemas em algum processo do equipamento. Exemplos de alarmes: falta de água, temperatura excessiva da câmara externa do forno, entre outros.

14. Programa de controle de processo: o controle de processo é feito a partir de uma rotina de passos definidos na programação do CLP. Existem diferentes programas, para diferentes tipos de materiais a serem processados.

- Sistema Estrutural:

1. Câmara superior: parte do forno que suporta a mufla metálica, resistores, e que se movimenta quando da abertura do forno. Também, é feita com duas chapas, para obtenção de uma camisa d'água para refrigeração da mesma.

2. Câmara inferior: parte do forno fixa que suporta os eletrodos, saída para o sistema de vácuo e outros sistemas. Também possui camisa d'água para refrigeração.

3. Flanges: são as partes das duas câmaras que se encostam quando de seu contato. Através de um anel de borracha, ocorre a vedação entre as câmaras durante o processo.

4. Suporte dos transformadores elétricos: sistema estrutural para colocação e acondicionamento dos transformadores elétricos.

5. Suporte de bombas: estrutura para acondicionamento das bombas de vácuo.

6. Pés de fixação do reator: em número de três, suportam mecanicamente todo o reator e seus sistemas.

7. Suporte dos módulos de potência: sistema de fixação dos tiristores e cabos elétricos, à frente dos transformadores elétricos.

8. Suporte das blindagens: a fixação das blindagens térmicas (mufla) nas câmaras superior e inferior é feita a partir de chapas e parafusos de fixação, em material de elevada resistência mecânica em altas temperaturas.

6.4 Design da concepção definida para o reator PADS

Após a definição da alternativa de projeto para o reator PADS, um modelamento 3D do *design* do equipamento foi realizado, em computador, levando-se em consideração as especificações de projeto e os itens definidos na alternativa de projeto da matriz morfológica, para a visualização dos sistemas do equipamento, bem como do leiaute do mesmo.

A seguir, imagens em 3D dos sistemas do reator são apresentadas.

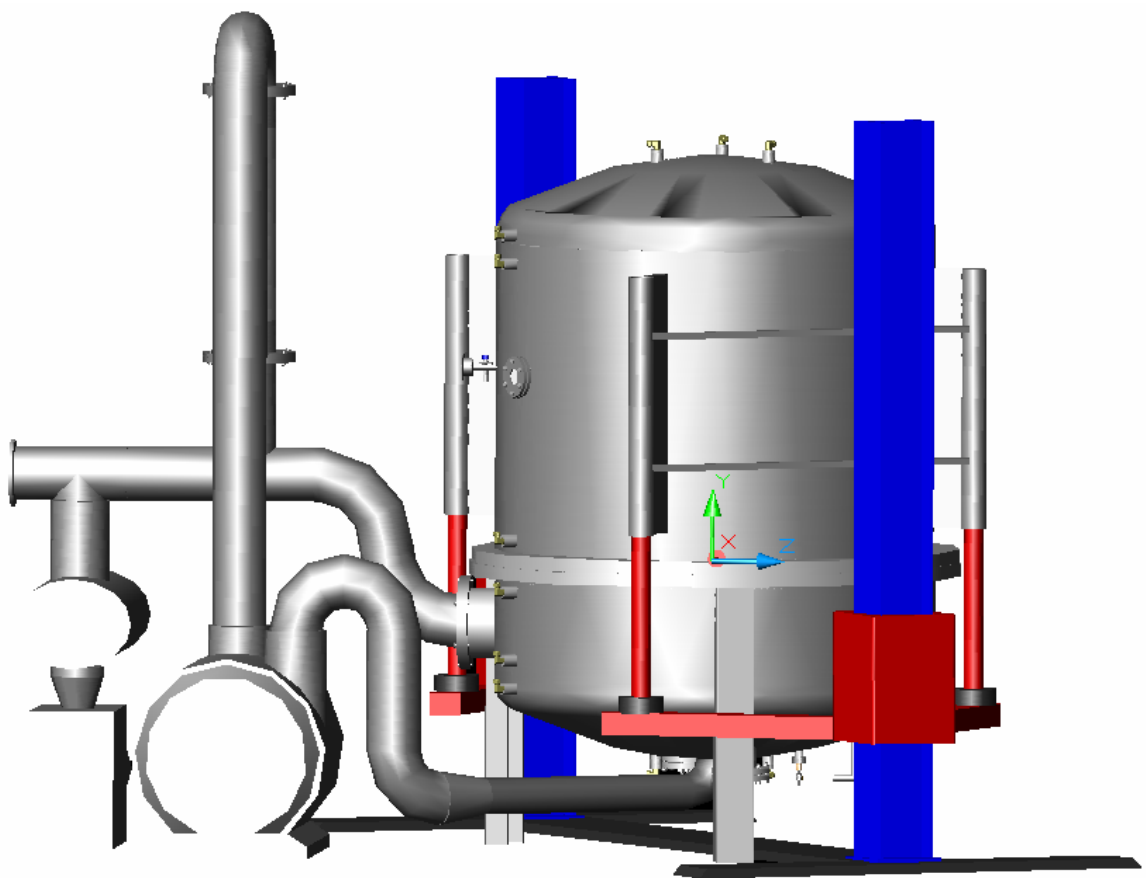


Figura 9. Vista do reator PADS.

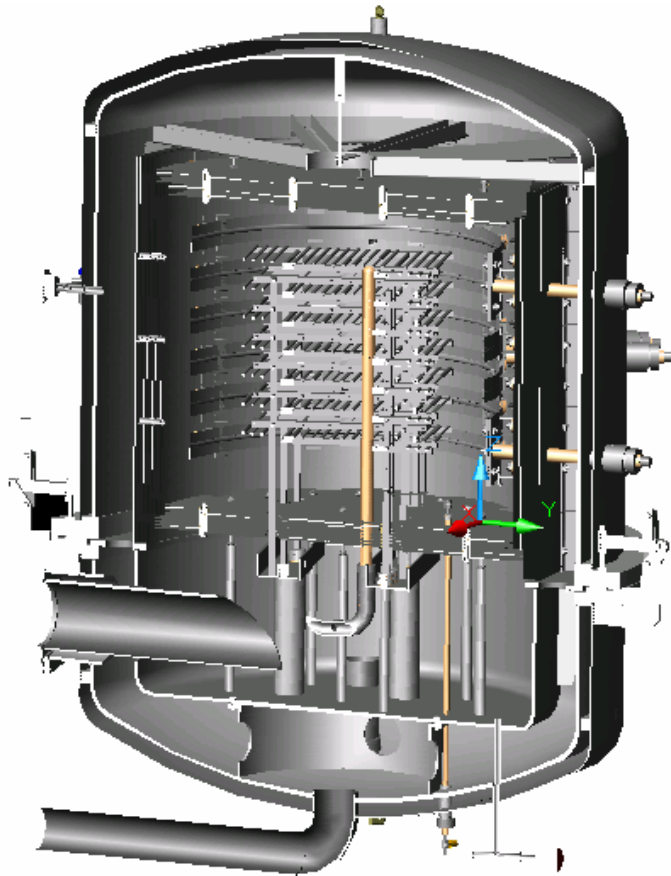


Figura 10. Vista em corte do reator PADS.

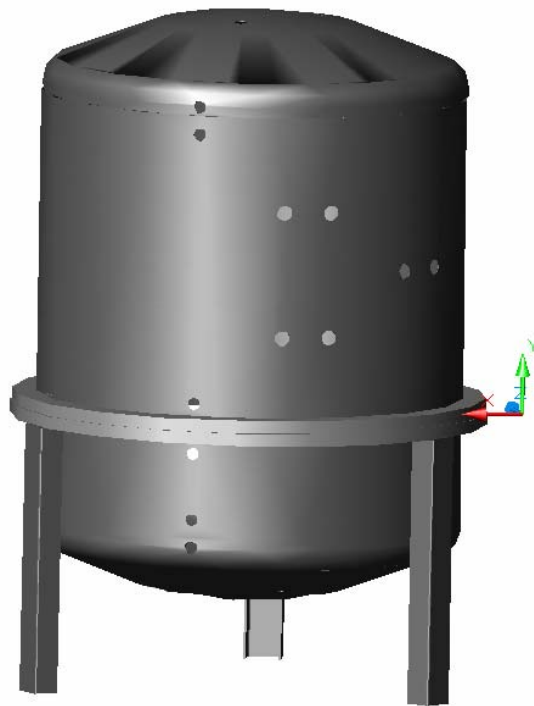


Figura 11. Estrutura mecânica da câmara do reator PADS.

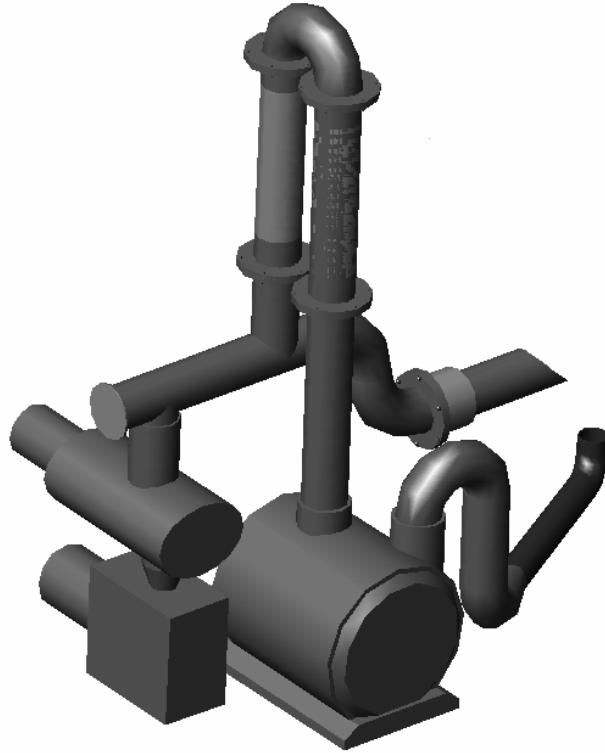


Figura 12. Sistema de resfriamento do reator PADS.

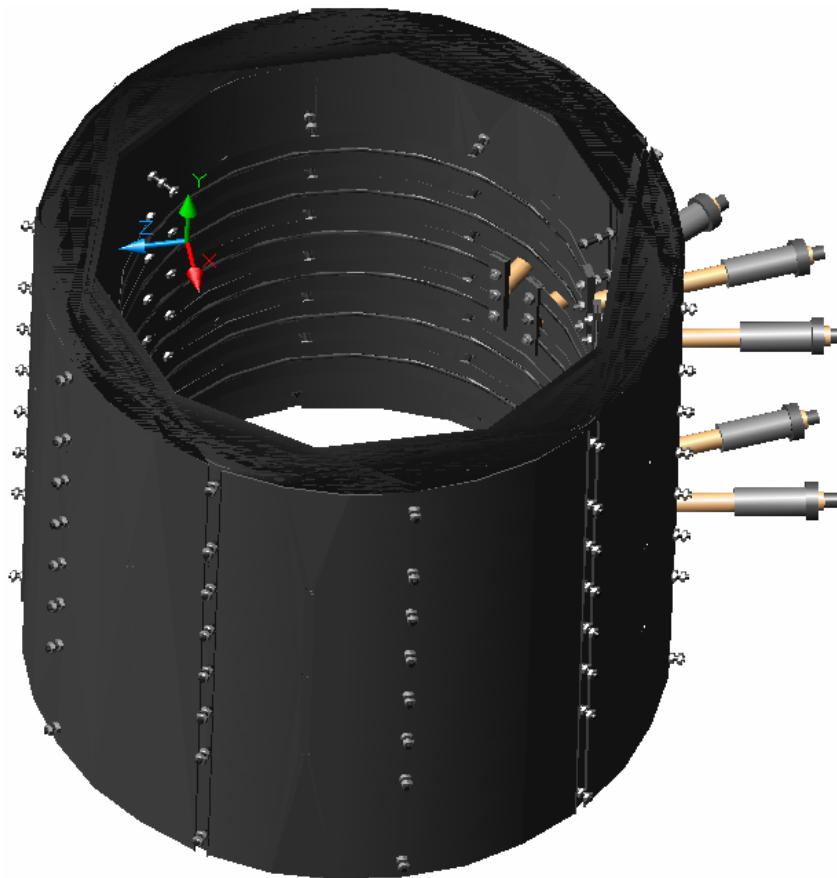


Figura 13. Mufla térmica do reator PADS.



Figura 14. Eletrodos para a descarga de plasma do reator PADS.

7. Projeto preliminar do reator

7.1 Sistema estrutural

O sistema estrutural do reator PADS é composto pelas estruturas mecânicas do forno e dos suportes dos equipamentos periféricos do equipamento.

Os suportes dos equipamentos periféricos (transformadores, bombas de vácuo, módulos de potência) não serão analisados quanto ao cálculo de resistência mecânica, por se tratarem de suportes simples, de baixa solicitação mecânica (fixos, sem esforços excessivos ou dinâmicos). Assim, apenas serão apresentadas as fotos de sua construção na seção construção do reator.

A estrutura da câmara do reator é composta por:

- câmara superior e flange superior;
- câmara inferior e flange inferior;
- suporte inferior interno;
- pés de fixação;

Como dito anteriormente, as câmaras do reator são compostas de parede dupla, devido a necessidade de utilização de uma camisa d'água para refrigeração das mesmas.

Desta forma, o esforço exercido pela pressão atmosférica (na forma de um vaso de pressão) é realizado sobre as câmaras internas do forno (a região interna das câmaras internas encontra-se sob vácuo). As câmaras externas não sofrem a ação da solicitação isostática da pressão atmosférica, pois a pressão é igual nas duas faces da mesma (interna e externa).

Para a câmara interna, esta força é exercida de fora para dentro, pois a pressão interna do forno é menor do que a pressão externa (interna 1 Torr e externa 760 Torr = 1 ATM).

As calotas das câmaras do reator foram projetadas segundo padrão comercial, levando-se em consideração o cálculo de resistência mecânica proposto pelo fabricante (Eica Estruturas). Assim, a partir da espessura de parede, obtida no cálculo para o dimensionamento da câmara interna, o dimensionamento da calota foi feito com a mesma espessura de parede.

O raio de curvatura da calota é grande o suficiente para a não geração de concentração de tensões na região de transição vertical/horizontal da câmara. Desta forma, a não transição abrupta entre a porção vertical e horizontal da câmara vai a favor da segurança quanto à resistência mecânica da câmara interna (vaso de pressão).

O dimensionamento, quanto a altura e o diâmetro do reator, foi definido segundo o volume útil requerido. A partir do dimensionamento da estrutura catodo/ânodo e mufla metálica, chegou-se a um diâmetro interno e altura requeridos para a câmara interna de 1273 e 1785 mm, respectivamente.

A razão comprimento/diâmetro do reator deve ser a mais próxima da unidade (1), de forma que a esbeltez da estrutura seja alta (para análise de modo de falha por flambagem).

O cálculo para a resistência à deflexão do reator (considerado como vaso de pressão) é apresentado a seguir. O material considerado para os cálculos foi o aço ao carbono SAE 1020 [20, 21, 22]

| Dados: | | | Fórmulas | | |
|------------------------|--------------|---------------------------|-----------------|-------------------------|---------------------------|
| Material: aço SAE 1020 | | Tensão escoamento (20°C) | 165 MPa | Tensão circunferencial: | $P \times r / e$ |
| Mód. Elastic (20°C). | 190 Gpa | Tensão ruptura (20°C) | 310 MPa | tensão longitudinal: | $P \times r / e \times 2$ |
| Mód. Elastic (165°C). | 150 GPa | | | | |
| coef. Poison | 0,3 | | | | |
| | | Tensão escoamento (165°C) | 124 MPa | | |
| Pressão | 0,101325 MPa | Tensão ruptura (165°C) | 133 MPa | Fator segurança ASME: | 5 |
| raio camara interna | 636,5 mm | | | | |

| espessura da camara hermética (mm) | Tensão circunferencial solicitada (MPa) | | Tensão longitudinal solicitada (MPa) | | Deformação circunferencial experimentada | | |
|------------------------------------|---|--------|--------------------------------------|-------|--|---------|-------|
| | Von Misses | ASME | Von Misses | ASME | Variação diametral mm/mm | | mm |
| | | | | | | | |
| 2 | 32,25 | 161,23 | 16,12 | 80,62 | 0,00014 | 0,00091 | 0,582 |
| 3 | 21,50 | 107,49 | 10,75 | 53,74 | 0,00010 | 0,00061 | 0,388 |
| 4 | 16,12 | 80,62 | 8,06 | 40,31 | 0,00007 | 0,00046 | 0,291 |
| 5 | 12,90 | 64,49 | 6,45 | 32,25 | 0,00006 | 0,00037 | 0,233 |
| 6 | 10,75 | 53,74 | 5,37 | 26,87 | 0,00005 | 0,00030 | 0,194 |
| 7 | 9,21 | 46,07 | 4,61 | 23,03 | 0,00004 | 0,00026 | 0,166 |
| 8 | 8,06 | 40,31 | 4,03 | 20,15 | 0,00004 | 0,00023 | 0,145 |
| 9 | 7,17 | 35,83 | 3,58 | 17,91 | 0,00003 | 0,00020 | 0,129 |
| 9,5 | 6,79 | 33,94 | 3,39 | 16,97 | 0,00003 | 0,00019 | 0,122 |
| 10 | 6,45 | 32,25 | 3,22 | 16,12 | 0,00003 | 0,00018 | 0,116 |

O valor da espessura utilizada foi 9,5 mm (3/8 de polegada). A razão comprimento / diâmetro utilizada foi 1,40. A utilização das propriedades mecânica do material a uma temperatura mais elevada que a ambiente deve-se ao fato de que esta estrutura, em sua condição mais crítica de trabalho, estará aquecida em virtude da radiação proveniente dos resistores elétricos (sobre esta condição a análise de modo de falha foi calculada, aproximadamente 165 °C).

Para os flanges das câmaras, a espessura da chapa utilizada foi de 25 mm, o que garante, para o cálculo de falha por deflexão, a integridade estrutural do sistema. A figura 15 traz o desenho proposto para a estrutura mecânica do reator PADS.

O suporte inferior interno tem por objetivo sustentar a estrutura catodo/anodo e proporcionar a refrigeração forçada através dos bocais radiais, por onde o gás de resfriamento passa. Desta forma, não há solicitação mecânica excessiva sobre o mesmo.

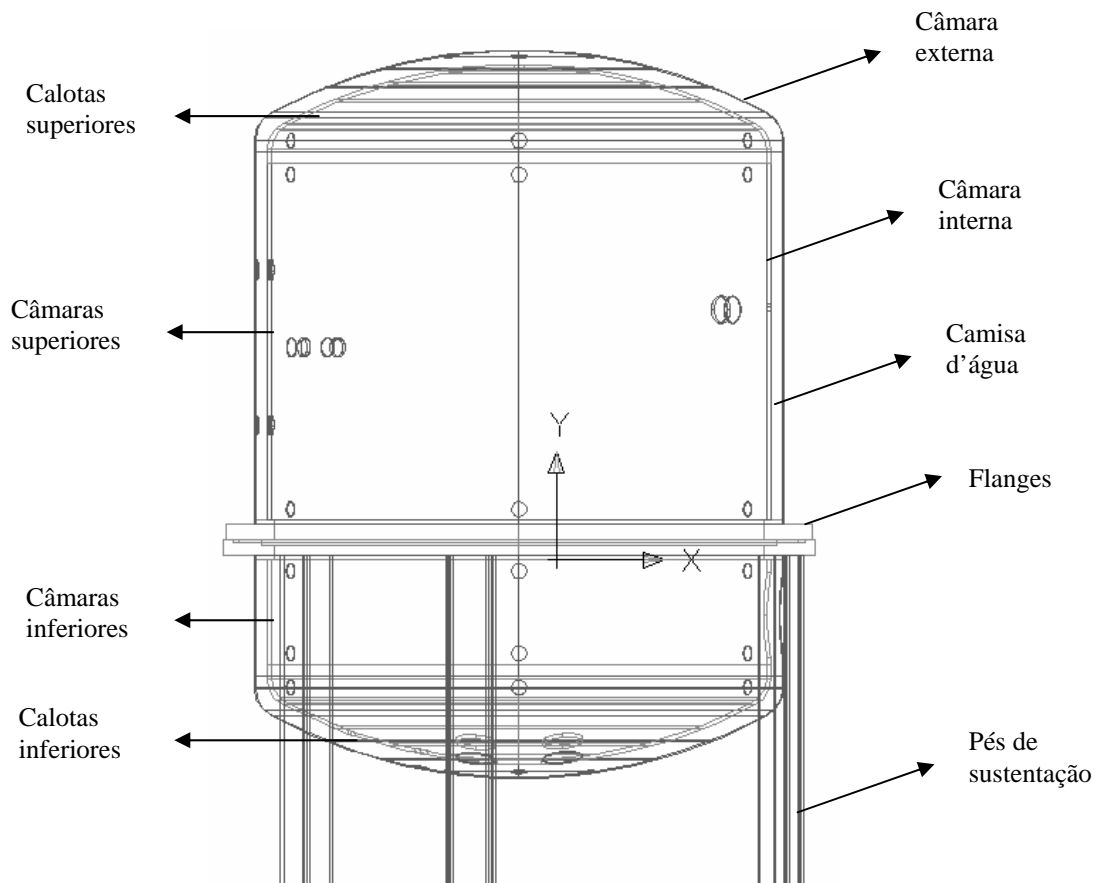


Figura 15. Geometria da estrutura do reator PADS.

Para a sustentação do reator foram utilizadas três colunas de apoio (pés de sustentação), na forma de viga em U. A carga, em kg, a qual as mesmas devem sustentar é de 2000 kg (massa total do reator com seus subsistemas fixos na câmara), o que significa 667 kg de carregamento para cada coluna. O cálculo para a resistência à flambagem das vigas é apresentado a seguir. O material considerado para os cálculos foi o aço ao carbono SAE 1020 [20, 22].

Flambagem das colunas de sustentação do reator:

Método de análise: viga engastada - livre

Dados:

perfil da viga utilizada: U
Dimensões: 150 x 100 x 5 mm

Momentos de Inércia:

$I_x = 1,76E-05 \text{ m}^4$
 $I_j = 6,38E-05 \text{ m}^4$
área da seção = $1,697E-03 \text{ m}^2$
Comprimento L: 0,9 mm

Fórmulas:

$$P_{cr} = (\pi^2 \times E \times I) / (2L)^2$$

$$T_c = P_{cr} / A$$

Material: aço SAE 1020
Mód. Elasticid. $1,90E+11 \text{ Pa}$
Coef. Segurança **3**

Cálculo das cargas críticas de flambagem:

| | | | |
|------------------------------|---|------|----------------------------|
| Pcr direção x | 10186402 N 10186 kN 3395 kN | Tc x | 2,0E+06 kPa 2,0E+03 MPa |
| carregamento admissível em x | 340 ton. | | |
| Pcr direção y | 36925708 N 36926 kN 12309 kN | Tc y | 7,3E+06 kPa 7,3E+03 MPa |
| carregamento admissível em y | 1231 ton. | | |

Assim, a seção transversal das vigas projetadas suporta o carregamento de trabalho sem falha por flambagem.

7.2 Sistema de aquecimento

A blindagem térmica do reator PADS, composta de materiais metálicos (na forma de chapas finas), tem por finalidade reter o calor gerado pela dissipação de energia térmica dos resistores elétricos (efeito Joule).

A utilização de chapas finas é justificada pela sua baixa condução térmica e alta refletividade. Desta forma, a cada blindagem adicionada, a temperatura é reduzida, retendo o calor na zona de trabalho e evitando perdas térmicas e o aquecimento excessivo das partes externas do equipamento.

A mufla foi projetada a partir de quatro chapas finas (0,5 mm) de molibdênio (a primeira em ML – molibdênio com 0,3 % de óxido de lantânio) e seis chapas finas (0,5 mm) em aço inoxidável AISI 304.

A utilização de Mo nas primeiras blindagens se justifica pelas altas temperaturas atingidas, e por este metal suportar estas altas temperaturas sem a ocorrência de deformações. Como o custo do Mo é elevado, abaixo de temperaturas da ordem de 1100°C a utilização de chapas em aço inoxidável pode ser empregada com êxito, sem a ocorrência de deformações excessivas.

O número de blindagens foi definido através do resultado obtido com o reator PADS piloto e cálculos de transferência de calor, apresentados no anexo 1.

Para os cálculos de transferência de calor [23], foi definido o volume de controle a ser analisado (figura 16). Após, montou-se o circuito térmico resistivo de forma a obter-se o fluxo de calor gerado entre a temperatura da resistência elétrica (1500 °C) e a temperatura externa da câmara externa (definido 60°C, por motivo de segurança).

O circuito térmico resistivo foi definido a partir de um sistema composto de dez blindagens radiais, duas paredes radiais (câmaras interna e externa) e a camisa d'água radial.

Foram considerados para os cálculos os processos de transferência de calor por radiação, condução e convecção.

O perfil de redução de temperatura, calculado para o volume de controle, está apresentado na figura 17.

A figura 17 ilustra uma redução de temperatura de aproximadamente 830 °C entre a temperatura do resistor elétrico e a última blindagem metálica. Esta variação indica que a utilização de 10 blindagens se faz necessária para uma baixa temperatura na câmara hermética interna.

Os valores de temperatura obtidos através dos cálculos, para cada componente do sistema térmico, são apresentados a seguir, na tabela 4.

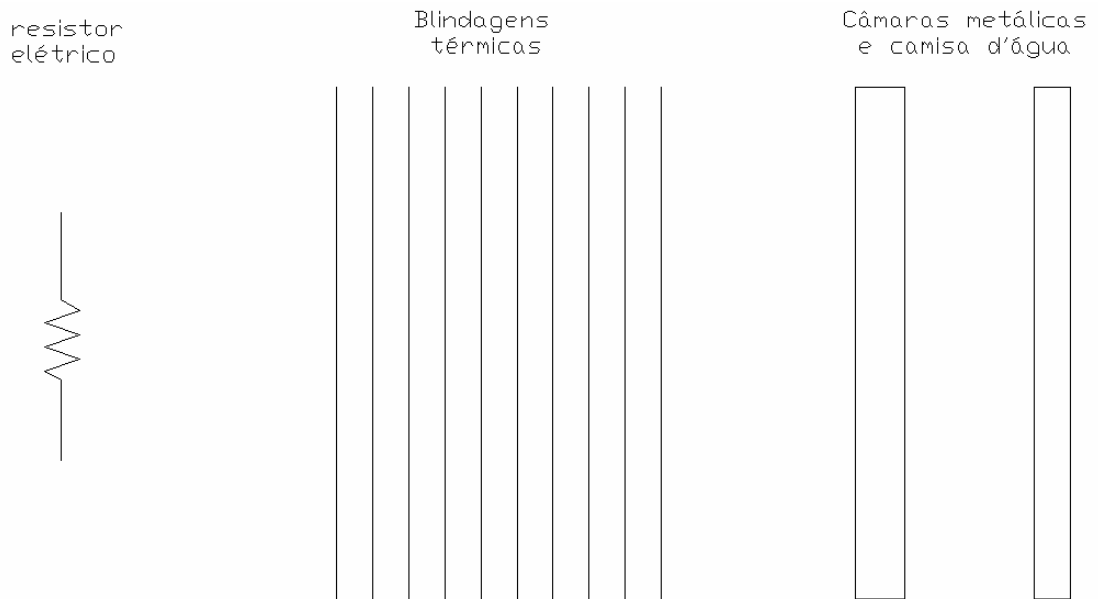


Figura 16. Volume de controle para a análise térmica do reator PADS.

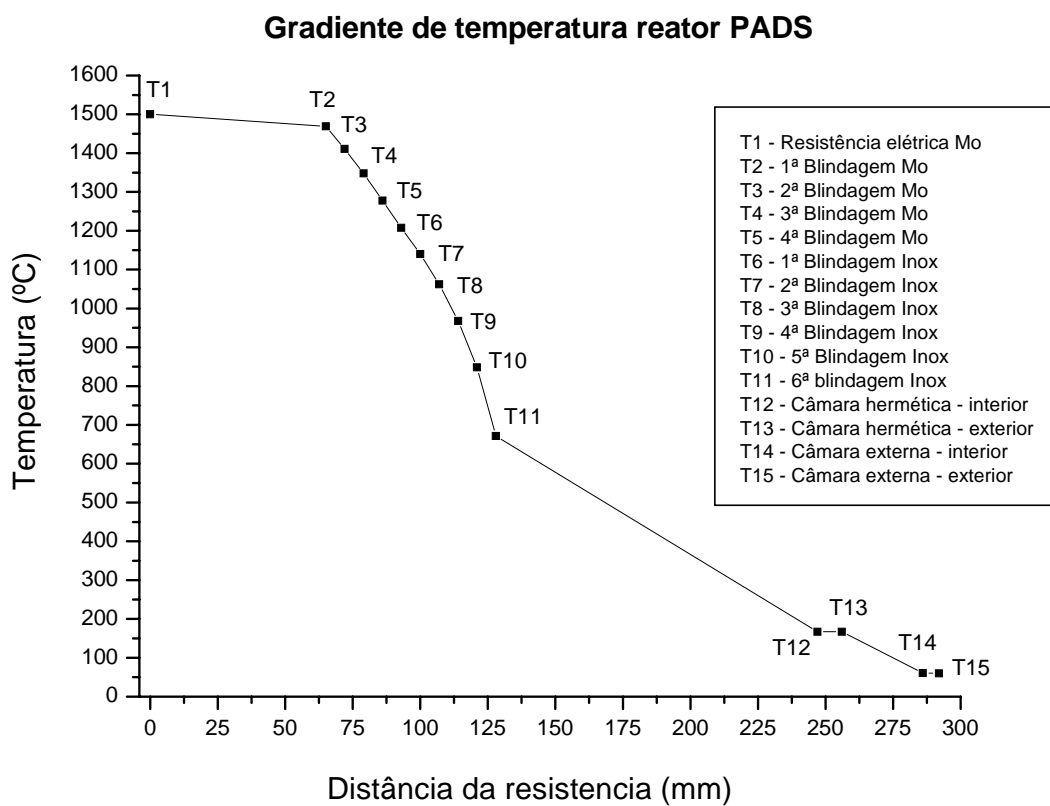


Figura 17. Gráfico da redução de temperatura do reator PADS com a utilização da mufla térmica e camisa d'água.

Tabela 4. Temperaturas das blindagens do reator PADS.

| Componente | Temperatura (°C) | Distancia radial (mm) | Distancia relativa entre componente consecutivos (mm) |
|-----------------------------|-------------------------|------------------------------|--|
| Resistencia eletrica | 1500 | 0 | 0 |
| Blindagem 1 - Mo | 1469 | 65 | 65 |
| Blindagem 2 - Mo | 1411 | 72 | 7 |
| Blindagem 3 - Mo | 1348 | 79 | 7 |
| Blindagem 4 - Mo | 1278 | 86 | 7 |
| Blindagem 5 - Inox | 1208 | 93 | 7 |
| Blindagem 6 - Inox | 1140 | 100 | 7 |
| Blindagem 7 - Inox | 1061 | 107 | 7 |
| Blindagem 8 - Inox | 968 | 114 | 7 |
| Blindagem 9 - Inox | 847 | 121 | 7 |
| Blindagem 10 - Inox | 671 | 128 | 7 |
| Camara hermetica - interior | 167 | 248 | 120 |
| Camara hermetica - externo | 167 | 257 | 9,525 |
| Camara externa - interior | 61 | 287 | 30 |
| Camara externa - externo | 60 | 293 | 6,350 |

Pela tabela apresentada, observa-se que o decréscimo da temperatura entre a resistência e a câmara externa, teoricamente, é de aproximadamente 1450 °C, em 300 mm. Esta distância entre a resistência e parte externa do reator define o diâmetro necessário para o projeto do forno (somando-se ao diâmetro útil de processamento de peças). O diagrama do sistema de blindagem térmica vertical do reator é apresentado na figura 18.

As regiões radial e horizontal (superior e inferior) do forno receberam o mesmo número de blindagens, e a sua disposição é apresentada na figura 19.

A partir do dimensionamento térmico, foi definida a potência total instalada do forno para o alcance da temperatura máxima de trabalho no volume útil requerido (e consequentemente a potência dos transformadores elétricos), bem como o dimensionamento dos resistores elétricos em molibdênio para o alcance da temperatura máxima desejada (1450 °C).

O volume útil requerido para o ambiente de processamento das peças é definido pelo diâmetro e altura requeridos pela estrutura catodo anodo.

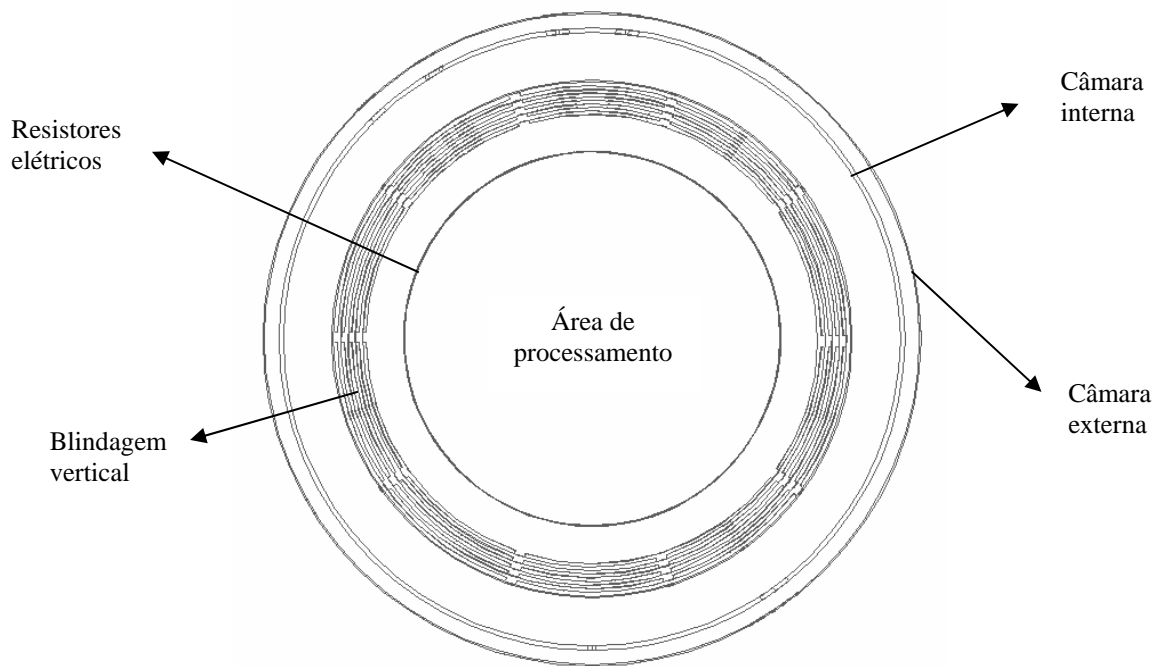


Figura 18. Esquema radial do sistema térmico do reator

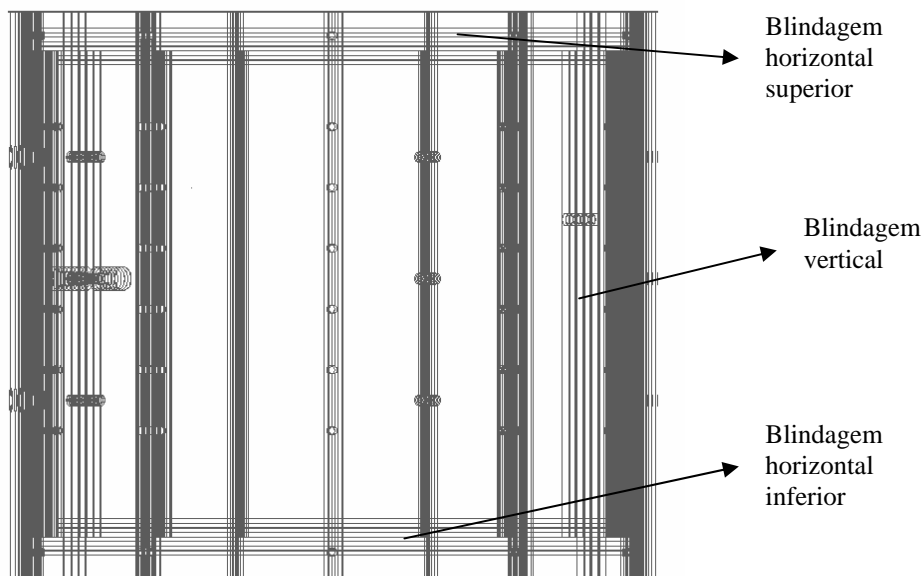


Figura 19. Esquema da mufla térmica do reator PADS.

A partir do projeto da estrutura de eletrodos, as dimensões úteis foram definidas com os seguintes valores:

- diâmetro: 780 mm;
- altura: 575 mm;

A potência total instalada, a partir da definição do volume útil desejado, foi definida levando-se em consideração a potência de fornos a vácuo similares, em tamanho e forma de utilização (fornos de sinterização de componentes *PIM*). A necessidade da utilização de taxas de aquecimento elevadas (da ordem de 15 a 20 °C/min) em altas temperaturas faz com que a potência instalada do forno seja elevada.

Para isso, foi definida uma potência total instalada de 150 kW (distribuída na forma de três transformadores elétricos de 50 kW cada).

Os transformadores elétricos foram definidos segundo a tensão e corrente de trabalho, em seus núcleos primário e secundário.

Para a alimentação dos mesmos, a tensão de trabalho definida foi 380 V (tensão da rede elétrica da fábrica), e a corrente de 131,5 A (produto $U \times I = P$ em W). No núcleo secundário, pela necessidade da dissipação de calor por efeito Joule, o emprego de elevadas correntes é necessário. Para isso, foi definido um fator de transformação de 7,3.

Desta forma, a tensão entregue nas resistências foi de 52 V (por motivo de segurança e não interação com a descarga de plasma, a partir da utilização de tensões abaixo de 60 V), enquanto que a corrente máxima do transformador foi 961 A.

A alimentação das resistências foi realizada de forma independente, ou seja, por alimentação monofásica, onde cada banco de resistores possui sua fase e neutro, evitando desta forma interações e desbalanceamentos, comuns quando da utilização de sistemas trifásicos em sistemas de aquecimento resistivo.

Com a definição da potência instalada e valores de tensão e corrente entregues às resistências, foi realizado o dimensionamento dos resistores elétricos, de forma que os mesmos atingissem a temperatura desejada com o par tensão e corrente definidos.

O esquema elétrico do forno, como comentado acima, foi definido a partir de três fases independentes. Com isso, três bancos de resistores elétricos (zonas) foram definidos, cada qual com uma potência instalada de 50 kW e controle eletrônico de aquecimento independente.

O esquema a seguir ilustra o diagrama elétrico resistivo do forno (figura 20). As zonas de aquecimento são independentes, controladas separadamente, cada uma com seu termopar de controle e módulo de disparo (tiristor).

Os componentes eletrônicos presentes no diagrama do sistema elétrico serão discutidos no sistema de aquisição e controle.

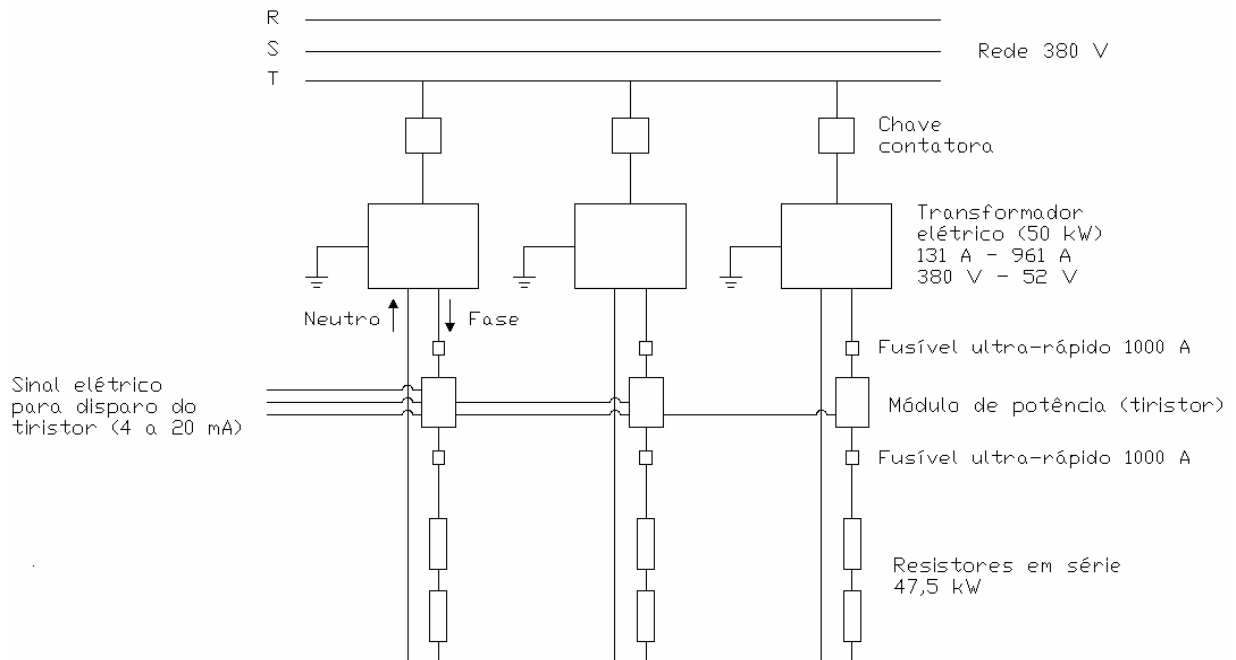


Figura 20. Diagrama elétrico do sistema resistivo do forno PADS.

A utilização de elementos resistivos em série define uma corrente menor do que quando da utilização de um sistema em paralelo, para uma mesma temperatura de trabalho desejada por fase.

Desta forma, para evitar a utilização de correntes muito elevadas (acima de 1600 A, para posterior divisão em 800 A no sistema em paralelo), e conseqüentemente, um dimensionamento e custo elevado com cabos elétricos e passadores de energia, foi definida a utilização de um sistema de resistores elétricos em série, para cada uma das três fases de aquecimento.

O cálculo para o dimensionamento dos resistores elétricos é apresentado a seguir [24].

Potência do trafo: 50kW = 50000 W
Tensão da resistencia: 52 V
Corrente máxima de operação instalada: 961 A

Potência elétrica do resistor: 47,5 kW = 47500 W (margem de segurança de 5% para o trafo)

Cálculo da corrente do resistor elétrico:

$$P = U \times I_{res}$$

$$I_{res} = P / U$$
$$I_{res} = 47500 / 52$$
$$I_{res} = 913 \text{ A}$$

Cálculo da resistencia ohmica do resistor elétrico:

$$I_{res} = \text{raiz}(P / R)$$
$$R = P / I \times I$$
$$R = 45000 / 913 \times 913$$
$$R = 0,05693 \text{ Ohm}$$

Cálculo da área da seção transversal do resistor elétrico (Ast):

$$R = r \times L / A_{st}$$
$$A_{st} = r \times L / R$$

r = resistividade elétrica do material
 r (Mo, a 1600°C) = 0,495 Ohm mm²/m (dado do fornecedor)

$$A_{st} = 0,495 \times 5,026 / 0,05693$$
$$A_{st} = 43,7033 \text{ mm}^2$$

L = comprimento do resistor elétrico
 $D = 800 \text{ mm}$, e $L = D \times \pi$
 $L = 2513 \text{ mm}$ para cada resistor - como são 2 elementos em série
 $L_{total} = 5026 \text{ mm} = 5,026 \text{ m}$

Espessura padrão para fita de Mo: 0,50, 0,63 e 0,75 mm (dado de fornecedor)
0,50 mm - fita muito fina - alta fragilidade
0,63 mm - melhor relação espessura / dissipação - **dimensão escolhida**
0,75 mm - espessura muito elevada - baixa dissipação de energia

Largura padrão para fita de Mo: 50, 60, 75 e 90 mm (dado do fornecedor)

Calculada a largura do resistor e de posse do catálogo do fornecedor, a largura definida para o resistor foi de 75 mm e a espessura 0,63 mm. O comprimento estendido para os dois resistores em série (somados) é de 5,026 m ($2 \times D \times \pi$). Com o seis elementos resistivos posicionados na altura útil da câmara, a distancia entre resistor foi de 75 mm.

A utilização da resistividade elétrica do Mo a uma temperatura mais alta do que a máxima requerida de trabalho (1600 ao invés de 1450 °C) se dá pelo fato de que para o atendimento de uma temperatura desejada na zona de trabalho, a temperatura do elemento resistivo, em forma de fita (caso do reator PADS), deve ser 150 °C maior, para que a radiação seja efetiva e a carga possa ser aquecida na temperatura desejada (informação do fornecedor de molibdênio).

7.3 Sistema de descarga de plasma

Os eletrodos catodo e anodo, os quais compõem a estrutura necessária para a geração da descarga de plasma, foram projetados em TZM (molibdênio, tântalo e zircônio), material este que possui 0,5% de Ti e 0,08% de Zr adicionados ao Mo, o que garante uma elevada temperatura de recristalização do material evitando desta forma uma baixa resistência à fluência dos materiais na temperatura de trabalho (1400 °C).

A escolha deste material deve-se a necessidade da estrutura não apresentar deformações na temperatura de sinterização da carga.

Para o aumento da rigidez da estrutura, e conseqüente menor nível de deformações, a estrutura catodo / anodo foi projetada a partir de barras (circulares e retangulares), pois desta forma a possibilidade de geração de arcos voltaicos devido a aproximação entre catodo e anodo (devido deformações) é minimizada.

A área catódica é um dado importante para a eficiência do processo, pois expressa, de forma quantitativa, a quantidade de espécies reativas formadas, a partir de condições de descarga definidas.

A área catódica é obtida somando-se todas as áreas superficiais dos itens que compõe a estrutura catodo. Quanto maior for esta área, maior será a quantidade de espécies reativas, e desta forma maior será a quantidade de peças a serem processadas (tendo os demais parâmetros fixados).

A partir da estrutura de eletrodos projetada para o reator piloto, em aço inoxidável AISI 310, a estrutura de eletrodos do reator PADS foi projetada (figura 21).

A otimização feita entre o projeto piloto e o industrial para o reator PADS está na distância entre as barras circulares paralelas de cada nível do catodo, que foi reduzida, para maior geração de espécies reativas (maior quantidade de barras para maior área catódica). Uma distância relativa entre as barras de catodo deve ser mantida, para a não geração de arcos voltaicos. Esta distancia deve ser maior do que 8 mm (valor obtido experimentalmente, com alto fator de segurança para não geração de arcos voltaicos).

O projeto de dois sistemas de eletrodos similares foi contemplado, uma vez que a utilização de barras excessivamente longas (maior do que 300 mm) causa, em altas

temperaturas, a formação de uma deflexão excessiva, o que pode levar a formação de arcos voltaicos.

Com o projeto das estruturas dos eletrodos, foi definido o volume útil para o carregamento com peças para processamento, bem como da área catódica total, em mm². Estes valores são apresentados na tabela 5.

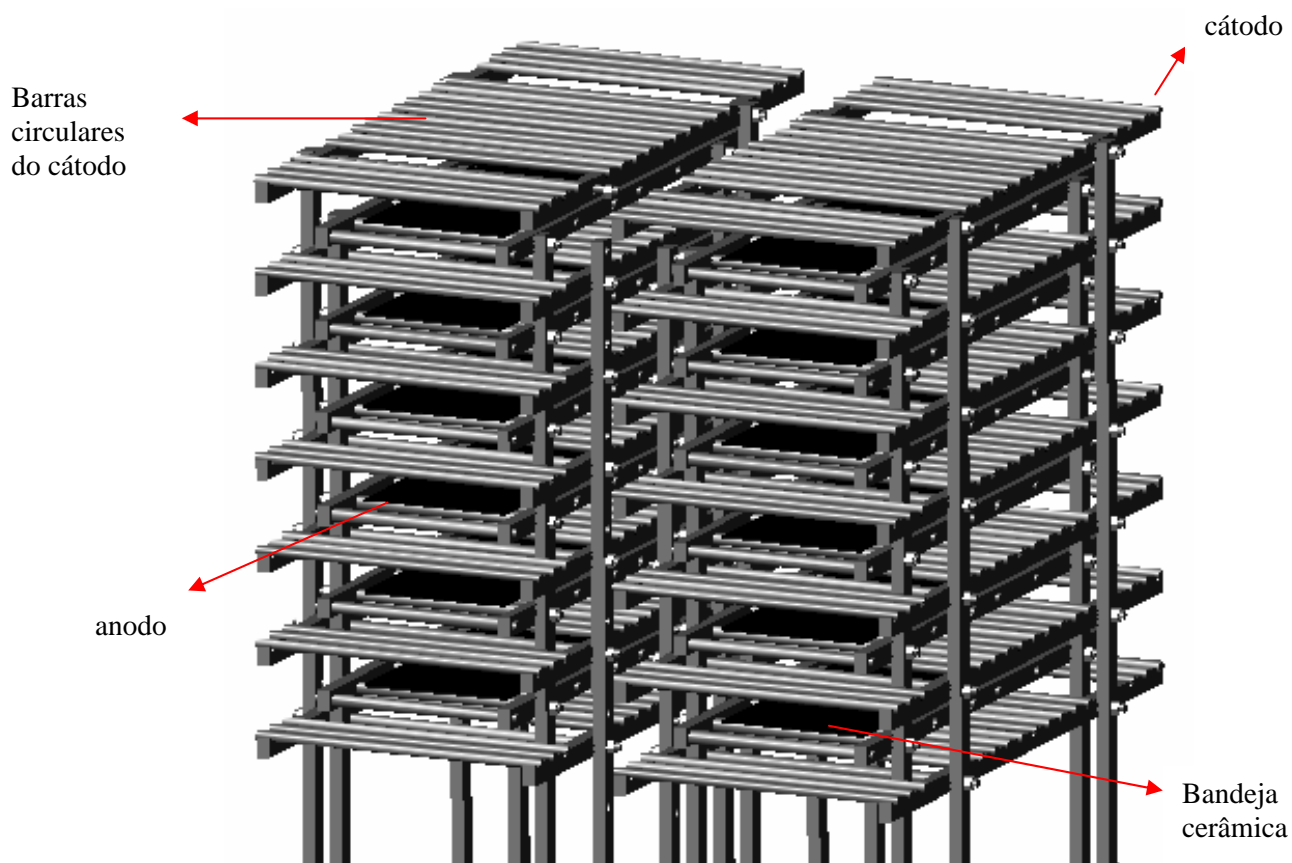


Figura 21. Estrutura de eletrodos do reator PADS.

Tabela 5. Dimensões definidas para a estrutura de eletrodos do reator PADS.

| Dimensão | Valor | Unidade |
|---|----------|-----------------|
| Altura útil por nível | 28 | mm |
| Área útil por nível | 36300 | mm ² |
| Volume útil por nível | 1016400 | mm ³ |
| Volume útil total por estrutura | 6098400 | mm ³ |
| Volume útil total | 12196800 | mm ³ |
| Área catódica | 2374398 | mm ² |
| Distância entre barras circulares da estrutura cátodo | 15,6 | mm |

A partir do design dos eletrodos, foram disponibilizados, por estrutura, seis níveis de carregamento verticais, com a capacidade de disposição de duas placas cerâmicas (110 x 165 mm, padrão Steelinject) ao longo do eixo plano do mesmo. Na altura de cada nível, a quantidade de placas (direção vertical) a serem utilizadas depende da altura dos componentes a serem processados.

Para o projeto, foi utilizada uma altura útil por nível de 28 mm, o que possibilita o processamento de peças de até 25 mm de altura.

Em termos de quantidade de bandejas carregadas com peças de produção, a quantidade varia de 24 (mínimo) até 96 (máximo) bandejas. A massa total de peças a ser processada depende do arranjo das peças na bandeja e da massa unitária de cada peça.

Cálculos aproximados com algumas peças em produção da empresa Steelinject levaram a uma massa total de até 15 kg, por processamento.

O isolamento do eletrodo catodo em relação ao restante do equipamento foi realizado com a utilização de cerâmicas em óxido de alumínio (Al_2O_3) com pureza mínima de 99,6 % e densificação superior a 99%.

A fonte de plasma utilizada no reator PADS foi a mesma existente na empresa Steelinject anteriormente (utilizada em outro reator de desenvolvimento, fabricado em 1999).

As especificações da mesma são:

- Tensão de trabalho: 400, 500, 600 e 700 V (escolha por *taps*, manualmente);
- Corrente: máximo 200 A;
- Forma e período do pulso: retangular, 250 μm ;
- Tempo ligado (T_{on}): 10 a 240 μm ;
- Proteção contra arcos voltaicos: manual ou automática;

Um transformador isolador (380 V) é utilizado de forma a evitar a interferência entre os sinais elétricos da descarga de plasma e dos resistores elétricos.

Com a utilização de uma distância entre os eletrodos e os resistores elétricos mínima de 50 mm, definida experimentalmente para a não interação entre as mesmas (ou seja, descarga de plasma nos resistores elétricos), não há nenhuma interferência do sinal elétrico

dos resistores na descarga de plasma. Assim, a utilização de um transformador isolador se faz necessária na fonte de plasma para a possibilidade de utilização do sistema híbrido plasma – resistores elétricos proposto.

7.4 Sistema de vácuo

A definição do sistema de vácuo, em termos de dimensionamento dos componentes, depende dos seguintes parâmetros do processo e características do equipamento:

- Volume da câmara do reator;
- Pressão de trabalho desejada;
- Vazão de gás utilizada e gerada (pelo polímero) na pressão de trabalho;
- Nível de vazamento do reator;
- Perda de carga com tubulações e demais componentes;

A partir destas informações, é possível projetar o sistema de bombeamento adequadamente, de forma a obtenção do nível de pressão desejada com a vazão de gás necessária para o processo.

A vazão de gás é composta de dois gases presentes no processo. O primeiro gás é o hidrogênio, responsável pelo processo de abertura e manutenção da descarga de plasma em baixa pressão. O segundo gás é o vapor de polímero, o qual evapora das peças e vai para a atmosfera do volume de processamento. Ambos os gases são bombeados para fora do reator pelo sistema de vácuo.

Assim, pode-se definir a quantidade máxima de gás utilizada a partir da soma de polímero presente na massa de peças processadas (a quantidade de polímero, a grosso modo, é igual a 4,0 % da massa total de peças) e o volume de gás H₂ adicionado.

Os valores dos parâmetros acima descritos são apresentados na tabela 6. Os cálculos para definição dos valores da tabela 6 são apresentados no anexo 2.

Para pressões de trabalho da ordem de 0,001 a 30 Torr, o sistema de bombas de vácuo é definido a partir de duas bombas: bomba mecânica e bomba *roots* (de lóbulos).

A necessidade da utilização de duas bombas de vácuo distintas está na característica de aplicação de cada uma destas bombas. Juntas, estas possibilitam o processamento na pressão e vazão de gás desejados.

Tabela 6. Valores dos parâmetros necessários para o dimensionamento do sistema de vácuo do reator PADS.

| característica | valor | unidade |
|---------------------------|--------------|-------------------|
| volume da camara | 2,0524 | m ³ |
| pressão de trabalho | 1 | Torr |
| vazão gas H ₂ | 20000 | sccm |
| vazão gas CH ₄ | . | sccm |
| perda de carga | 65 | % |
| nível de vazamento | 0,010 | Torr/min |
| Velocidade de bombeamento | 298 | m ³ /h |

A bomba mecânica é utilizada para aplicações onde se deseja realizar um vácuo da ordem de no máximo 10 Torr, com grandes volumes de gás a serem deslocados. Estas bombas caracterizam-se por apresentar uma baixa velocidade de deslocamento e grandes volumes de gás deslocados. Não apresentam um vácuo final elevado.

A bomba de lóbulos é utilizada para aplicações onde se deseja o alcance de um vácuo de até 0,001 Torr, para pequenos volumes de gás a serem deslocados. As características destas bombas são: alta velocidade de deslocamento e pequenos volumes de gás deslocados. O vácuo final atingido é mais baixo que o das bombas mecânicas.

Quando da utilização destas duas bombas no mesmo sistema, em série, a bomba mecânica é acionada primeiramente, de forma a reduzir a pressão da câmara a um valor de aproximadamente 50 Torr, quando então a bomba *roots* pode ser acionada, sem danificá-la (risco de queima por sobre-corrente no motor elétrico da mesma).

Como a pressão de trabalho requerida não é reduzida (acima de 0,010 Torr), não há a necessidade da utilização de uma bomba de vácuo difusora.

De posse dos valores para dimensionamento do sistema de bombeamento, foi utilizada a tabela de curvas de desempenho de sistemas de bombas de vácuo da marca BOC Edwards [25] para definição do sistema de vácuo. Com isso, foi definida a utilização de um sistema de bombas cuja curva de pressão (fluido: ar) está apresentada na figura 22 (modelos E2M80 + EH1200, mecânica e *roots*, respectivamente).

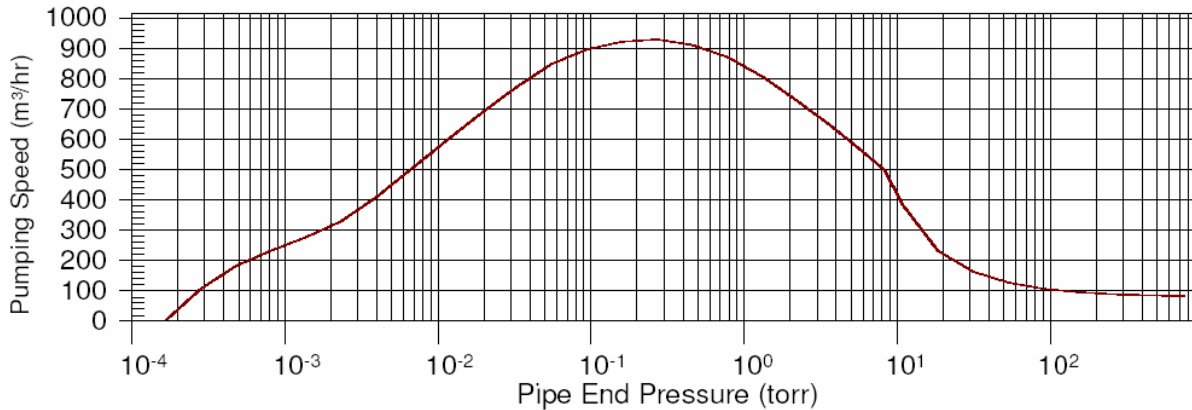


Figura 22. Curva de pressão para o conjunto de bombas do reator PADS (dado do fornecedor).

Observa-se, pelo gráfico acima, que para a pressão de trabalho de 1 Torr, a velocidade de bombeamento é igual a 845 m³/hora, ou 14.083 l/min.

Esta avaliação é feita para as bombas de vácuo somente. Para o sistema composto pelo reator, tubulações, válvulas e sistema de bombas de vácuo, este valor reduz para 298 m³/hora, ou 4967 l/min (redução de 65 %), em função da perda de carga imposta pelo sistema mecânico.

Esta redução significativa na velocidade de bombeamento não afeta o desempenho das bombas de vácuo, uma vez que a quantidade de gás adicionada (hidrogênio) e a gerada internamente no reator (vapores de hidrocarbonetos do tipo C_xH_y) é muito menor àquela disponível para sucção nas bombas de vácuo (4967 l/min disponível contra 100 l/min bombeados).

A válvula controladora de pressão atua de forma a manter a pressão de trabalho em seu valor pré-estabelecido, em função da quantidade de gás adicionado ao sistema, bem como do gás gerado no ambiente de processamento. A abertura desta válvula se dá por meio de um sistema servo-mecânico, onde a partir de um atuador elétrico, o eixo da válvula

controladora move-se radialmente, entre valores de 0 a 90°, controlando a pressão de trabalho a partir da relação entre os valores de pressão real, pressão pré-estabelecida e o ângulo de abertura da válvula.

Um tubo flexível é utilizado para reduzir o nível de vibração das bombas de vácuo para o reator, o que poderia prejudicar a integridade estrutural dos componentes em processamento. Uma válvula gaveta é utilizada para a vedação da câmara do reator, para quando o sistema de vácuo estiver desligado, evitando desta forma a pressurização do reator, o que prejudica o ponto de orvalho do mesmo (nível de oxigênio do reator).

A utilização de um *trap* (coletor) é realizada para a retenção de eventuais resíduos sólidos que por ventura se acumulem na entrada da bomba roots, o que pode prejudicar a performance e/ou funcionamento da mesma.

7.5 Sistema de gases

A introdução dos gases de processo é feita através de fluxímetros, os quais disponibilizam, segundo um sinal elétrico enviado por um controlador de processo, a vazão de gás desejada.

A distribuição deste gás dentro da câmara do reator é feita através de um *plenum* (difusor de gás), o qual possibilita a introdução do gás na região mais alta do volume útil do equipamento.

O difusor de gás consiste de dois tubos, abertos na porção mais superior, e é feito em molibdênio, devido a necessidade do mesmo suportar as altas temperaturas de trabalho sem apresentar deformações.

A inserção do gás na região mais alta do volume é feita de forma que o mesmo atinja todo o volume útil, sendo então bombeado pelo sistema de vácuo na região mais inferior da câmara.

Nenhuma abertura ampla para a passagem do gás é feita, de forma que o tempo de residência do mesmo na câmara seja o maior possível.

A pressão da linha dos gases é mantida através de um sistema de distribuição de gases que abastece toda a empresa Steelinject, e o valor da mesma varia entre 6 e 8 bar.

7.6 Sistema de resfriamento

A refrigeração dos sistemas que necessitam de arrefecimento é feita com a utilização de água, a qual é resfriada em uma das torres de arrefecimento da empresa Steelinject Ltda.

A camisa d'água do reator, a qual possui uma distancia entre as paredes de 30 mm, é utilizada para remover o calor proveniente da radiação dos resistores elétricos. Admitindo que a temperatura externa da câmara exterior é de 60 °C, a vazão de água necessária para a remoção do calor gerado pela superfície interna da câmara hermética a 165 °C é 762 l/min [23,26] (cálculos apresentados no anexo 3).

A temperatura da água na entrada do reator é mantida sempre abaixo de 20 °C. As mangueiras de água são de borracha, e o diâmetro útil das mesmas é de 9,52 mm.

Para a refrigeração forçada, ao final do ciclo do processamento, foi projetado um sistema de circulação forçada com gás nitrogênio (inerte). Esta circulação forçada é feita a partir de um circuito fechado, composto de um sistema de trocadores de calor (do tipo casca e tubos), de um ventilador hermético (centrífugo) e de um sistema de distribuição do gás no interior da câmara.

A partir da temperatura máxima para o início da refrigeração forçada, do volume de gás na câmara e da pressão do mesmo foram dimensionados os trocadores de calor e ventilador, para que a temperatura no interior da mufla metálica reduza de 700 para 60 °C em 90 minutos. Os cálculos do dimensionamento dos trocadores de calor e determinação do ventilador estão apresentados no anexo 4.

O sistema de distribuição de gás (ou difusor de gás) no interior da câmara consiste de uma estrutura circular com aberturas radiais, de forma que o gás entra radialmente na mufla, pela sua parte externa, e a partir de furos colocados na mufla metálica, o gás entra na mufla (de fora para dentro), fazendo a troca de calor com as partes quentes do reator.

O gás sai do reator pela tubulação do sistema de vácuo, porém, nesta etapa, a válvula gaveta das bombas de vácuo é fechada, e a circulação do gás é feita pelo ventilador (o circuito fechado da refrigeração é apresentado na figura 23).

A utilização da pressão atmosférica do gás no resfriamento no reator favorece uma troca térmica mais efetiva do que da utilização de uma pressão negativa, pois desta forma a quantidade de gás inserida na câmara é maior, bem como a pressão de troca é maior, logo a troca por convecção é maior.

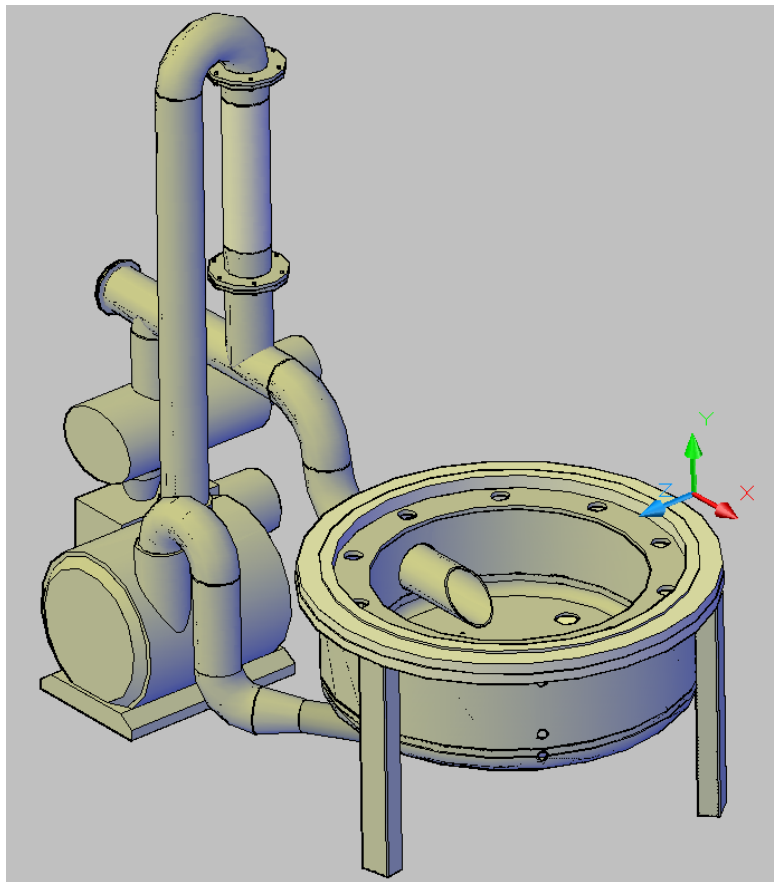


Figura 23. Esquema do circuito fechado de refrigeração do reator PADS.

Durante a etapa de resfriamento forçado, devido ao aquecimento do gás quando de seu aquecimento na câmara, a pressão do mesmo cai (devido a compressão do mesmo).

Desta forma, um sistema de compensação da pressão do gás é utilizado, de forma a manter no circuito uma pressão sempre superior a 750 Torr, de forma que não haja a queima do motor do ventilador devido a pressão negativa muito baixa (vácuo).

Para os flanges que possuem anéis de vedação (estes são aquecidos pela condução de calor de partes metálicas quentes) um sistema de camisa d'água é disposto de forma a evitar que a temperatura dos anéis *o'rings* ultrapasse os 80 °C (o material dos mesmos é borracha vinílica ou Viton), porém a temperatura da água dos flanges não deve exceder os 90 °C, de forma a evitar a formação de vapor d'água, o que prejudica a circulação da água de refrigeração. A tubulação d'água destes flanges é feita com tubos de cobre de ¼" de diâmetro útil.

7.7 Sistema de movimentação

A movimentação das partes móveis do reator (câmara superior, cabos elétricos e fiação de sensores e equipamentos de monitoramento) é realizada através de um sistema de elevação, através de um elevador comercial de automóveis.

O dimensionamento deste elevador (*eleva-car*) foi feito através da massa total dos componentes e sistemas fixos a câmara superior do reator. A massa total do sistema móvel é de aproximadamente de 1500 kg.

De posse do valor da massa a ser movimentada, foi adquirido um sistema para 2500 kg, de modo que o mesmo opere com folga em relação a carga máxima permitida (ainda assim o fator de segurança deste equipamento é elevado).

O acionamento do mesmo é feito através de uma chave com dois botões (subir e descer). Duas chaves fim de curso definem o curso útil do equipamento, de forma que o mesmo não se movimente além do curso útil definido.

A fixação e centralização do reator no elevador são realizadas através de dois pinos guias, os quais são soldados na câmara superior do reator, por meio de uma estrutura metálica.

O sistema de movimentação é feito através de um fuso e uma corrente.

O dimensionamento do comprimento dos cabos elétricos e fiação dos equipamentos fixos à câmara superior são realizados de forma que haja uma folga para a movimentação dos mesmos, sem a solicitação de uma força excessiva sobre os terminais elétricos, o que pode danificar o sinal elétrico e até mesmo os equipamentos de monitoramento e controle.

7.8 Sistema de aquisição, monitoramento e controle de processo

A aquisição, monitoramento e controle dos parâmetros de processo do reator PADS são realizados através de sensores e equipamentos dedicados para cada aplicação.

Basicamente, as variáveis de processo controladas no processo PADS são:

- Temperatura das zonas de trabalho e da parte externa da mufla;
- Pressão interna do reator e da etapa de refrigeração;
- Corrente de plasma e dos resistores elétricos;
- Vazão dos gases de processo;
- Tempos e eventos dos processos de rotina do reator;

Para o processamento destas variáveis, uma série de equipamentos eletrônicos é utilizada de forma a garantir o perfeito funcionamento do equipamento, de forma automática e simples, com interface clara e objetiva para o operador do equipamento.

A seguir, a tabela 7 ilustra os diferentes sensores utilizados, seu tipo de sinal e faixa de valor de sinal empregado para o controle do equipamento.

O controle geral do processo do equipamento é feito a partir de um CLP (controlador lógico programável), o qual, através de rotinas de processo realizadas em linguagem de programação, executa as funções requeridas pelo processo, através de sinais eletrônicos de entradas e saídas, analógicas ou digitais.

Tabela 7. Sensores utilizados no reator PADS e suas características.

| sensor | tipo | tipo de sinal | sinal de processo | unidade de saída |
|-------------------------|---------------------|---------------|-------------------|------------------|
| termopar | R | analógico | 0 - 100 mV | ° C |
| termopar | K | analogico | 0 - 100 mV | ° C |
| pressão | membrana capacitiva | analogico | 1 a 10 V | Torr |
| pressão | pressostato | analogico | 4 a 20 mA | Volt |
| corrente | Hall | analogico | 0 a 40 A | A |
| vazão | fluxímetro | analogico | 0 a 10 V | sccm |
| tiristor | diodo | analogico | 4 a 20 mA | Volt |
| válvula | servo-assistida | analogico | 0 a 10 V | ° (graus) |
| válvula | relé | digital | 0 ou 1 | - |
| corrente | transdutor | analogico | 0 a 5 A | A |
| controlador de processo | universal | analogico | 0 a 10 V | °C |

As principais linhas de sinais são apresentadas no diagrama esquemático do reator, na figura 24.

A programação dos ciclos de processamento é feita no CLP, onde se definem os passos, parâmetros e eventos desejados para o ciclo de processamento. Esta programação dos ciclos no CLP é feita de forma manual, pelo operador, através da interface homem-máquina (IHM), conhecida também como tela *touch-screen*.

A rotina da programação também é feita por linguagem de programação, e a mesma é realizada por pessoal especializado em automação industrial (conhecidos como integradores).

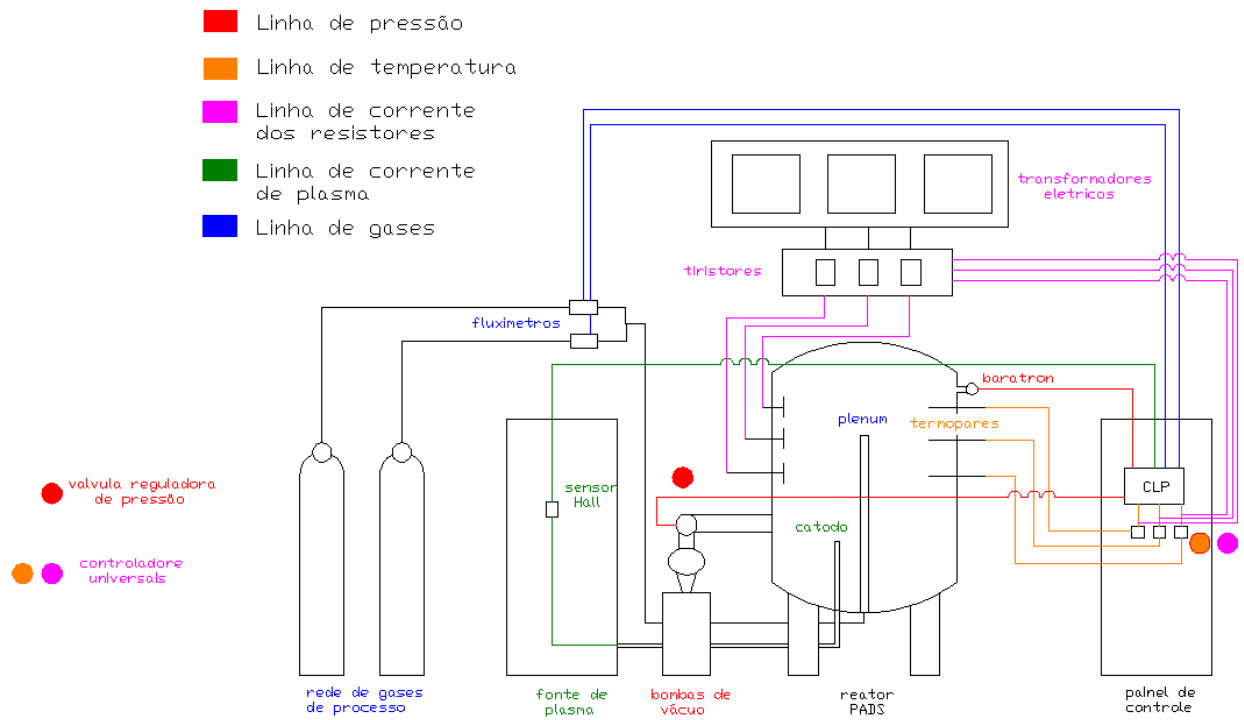


Figura 24. Diagrama de redes de sinais do reator PADS.

7.9 Leiaute preliminar do reator PADS

A geração da alternativa conceitual (solução) foi única, diferentemente do que sugere a metodologia de projeto. A explicação para isto está no fato de que um reator em escala piloto foi construído previamente (LabMat – UFSC) e a partir deste, com melhorias definidas em seu projeto, partiu-se para o projeto do equipamento em escala industrial, sem a geração de mais de uma solução conceitual, na etapa de projeto conceitual.

A seguir são apresentados detalhes de projeto dos sistemas do equipamento, bem como do leiaute preliminar do reator PADS (na forma de figuras).

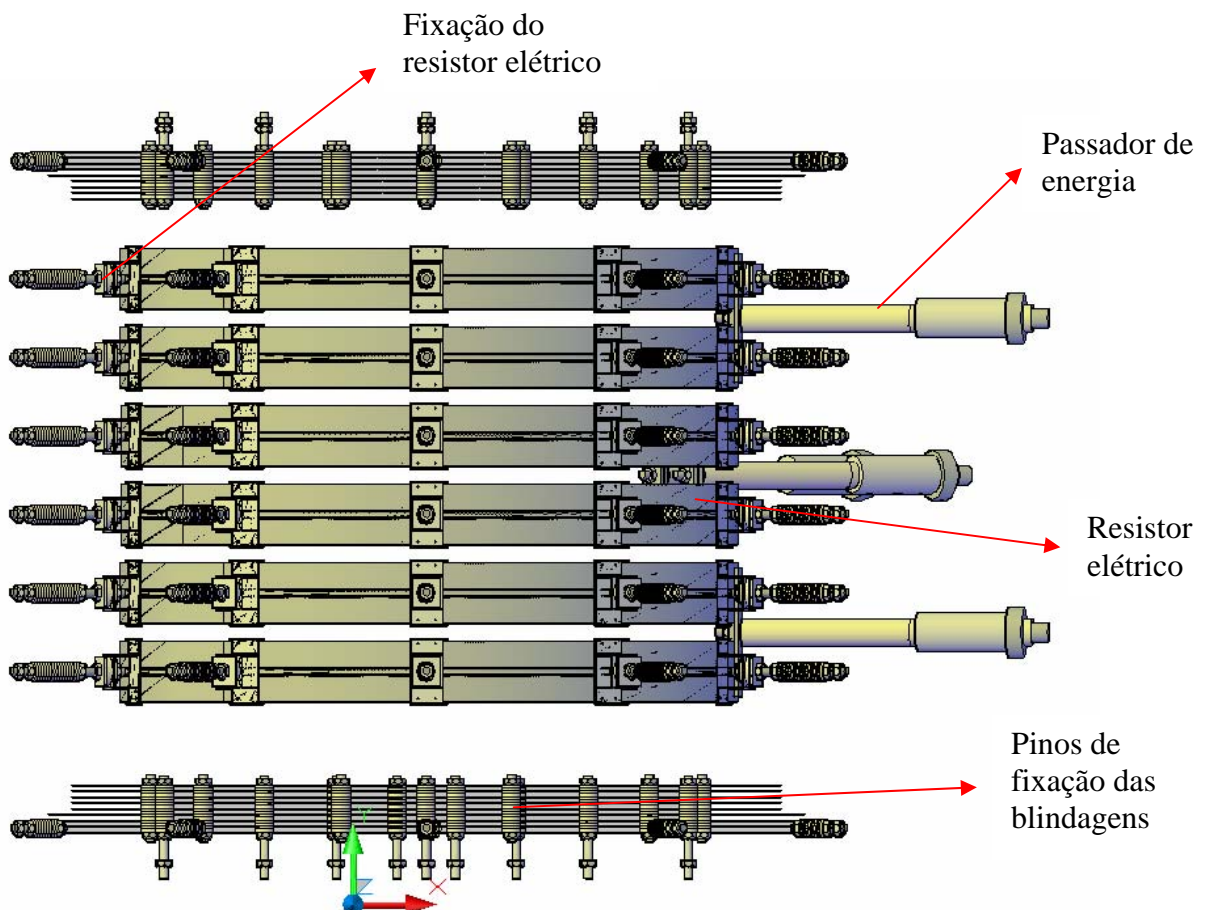


Figura 25. Esquema da mufla térmica do reator PADS (frontal).

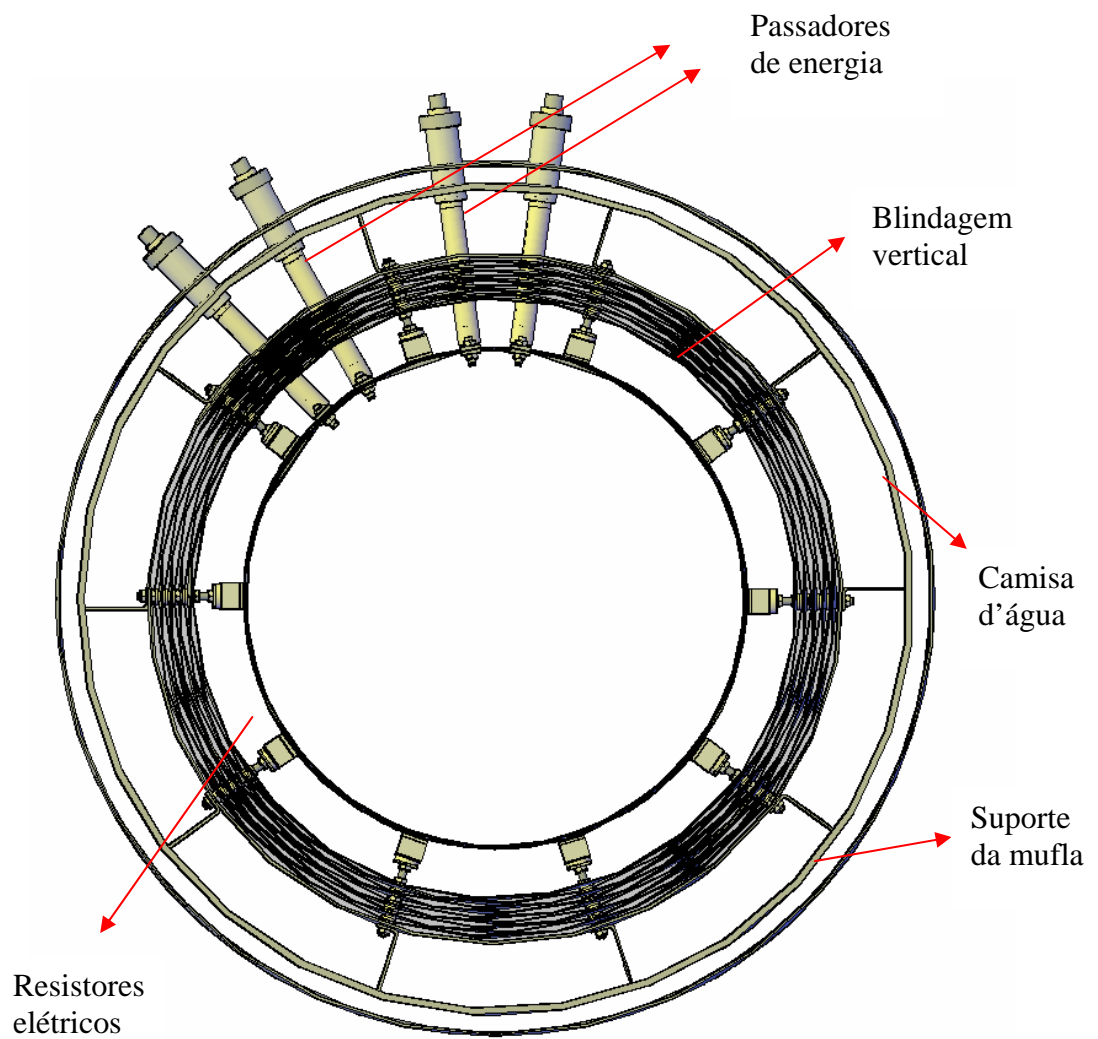


Figura 26. Esquema da mufla térmica do reator PADS (superior).

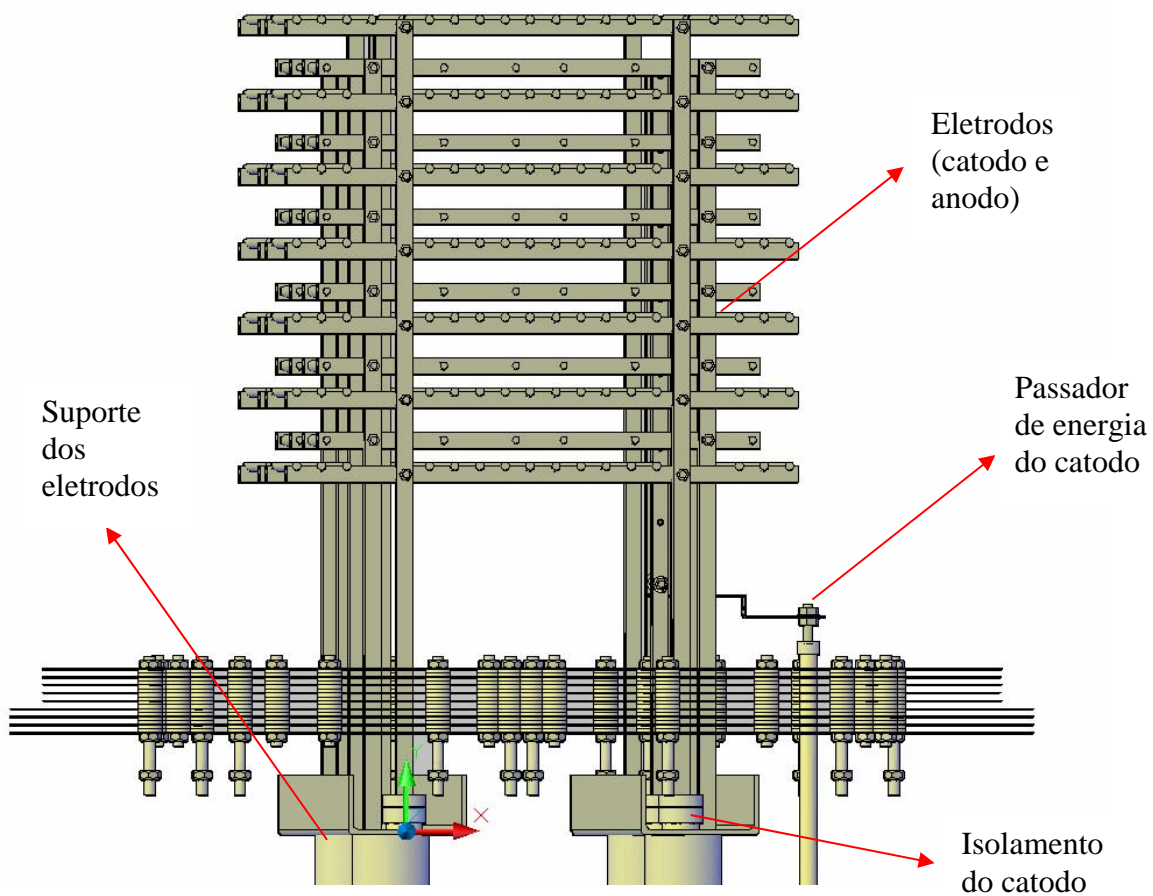


Figura 27. Sistema de eletrodos do reator PADS.

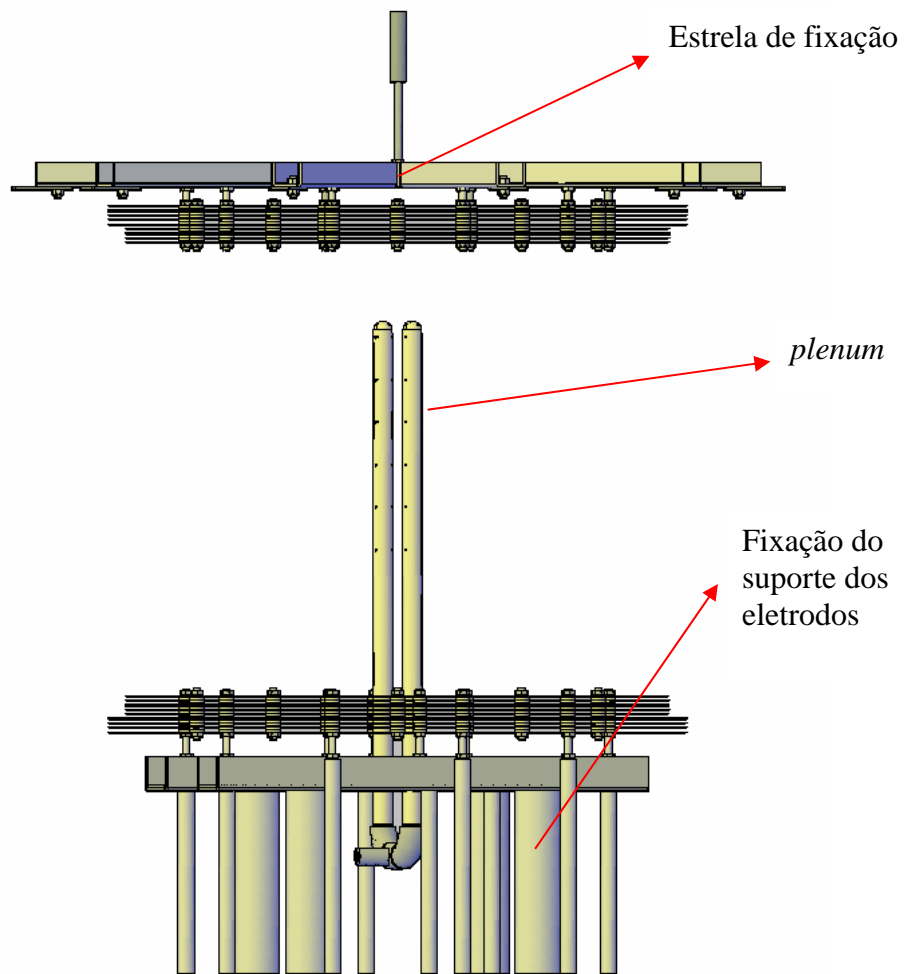


Figura 28. Distribuição do gás do reator PADS..

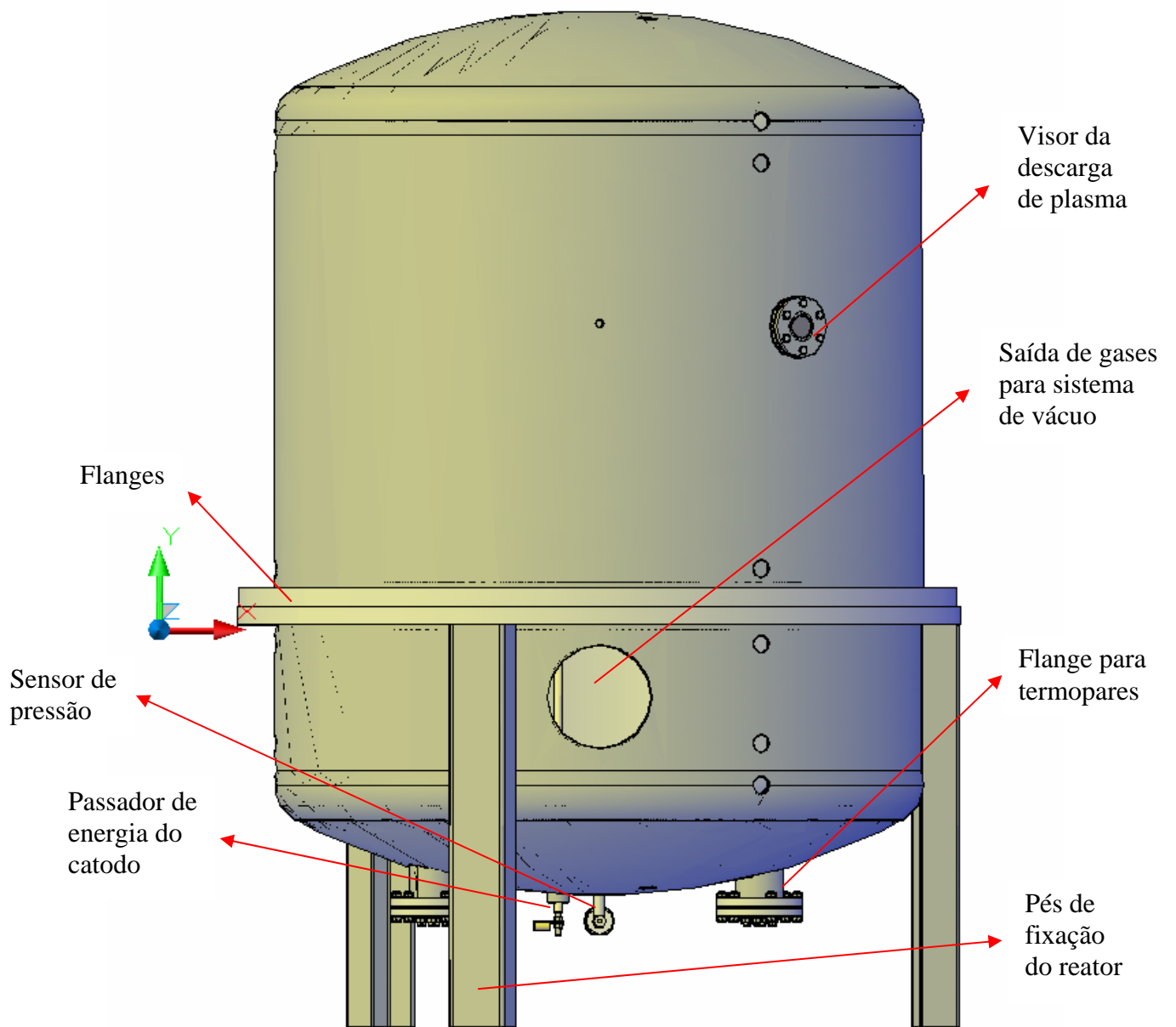


Figura 29. Câmara do reator PADS.

8. Projeto detalhado do reator

8.1 Programação dos ciclos

O processamento dos componentes injetados depende de características e parâmetros de processo, que diferem de componente para componente, dependendo de sua geometria, material e tamanho do lote de processamento.

Como descrito na etapa de projeto informacional, um dos requisitos do equipamento é que o mesmo seja operado de forma automática, ou seja, independente da ação do operador. Logicamente, o início do processo deve ser feito pelo operador, mas a partir deste momento, o equipamento deve operar sem a intervenção humana.

Para que o processo se proceda de forma automática, uma série de parâmetros e eventos precisam ser definidos. A programação dos ciclos, nesse sentido, é fundamental para que o processamento seja realizado de forma adequada e satisfatória.

Em termos de parâmetros de programação do equipamento, as variáveis a serem controladas são:

- tempo do passo;
- temperatura inicial e final do passo;
- pressão da câmara;
- vazão dos gases de processo;
- Razão tempo de plasma ligado sobre tempo total
- eventos de processo (aquecimento, descarga de plasma, pressurização da câmara, ventilador, fim de ciclo);
- comandos independentes (bombas de vácuo, válvula borboleta, movimentação da câmara, habilitação do aquecimento, início de ciclo);

A utilização do CLP Siemens® (definido devido melhor relação custo/benefício) permite a utilização de 8 entradas e 8 saídas analógicas e digitais (32 no total), bem como 4 portas de comunicação serial.

Este controlador permite o armazenamento de até 14 programas distintos, memorizáveis, cada um com no máximo 20 passos por programa.

Uma limitação do equipamento é o controle PID (proporcional, integral e derivativo) para rampas e patamares de aquecimento. O mesmo não possui a função auto-tuning (auto-ajuste), o que permitiria um auto-ajuste para atender as especificações de programação desejadas.

Esta deficiência foi suprida utilizando controladores universais de programação (Novus®), os quais possuem um controle PID com tal função, bem como admitem receber um sinal de *set point* de outro controlador, como o CLP. Desta forma, o problema do controle de aquecimento pode ser resolvido de uma maneira rápida, econômica e eficaz.

A tela de programação definida para o reator PADS é apresentada a seguir, na figura 30.

| | | | |
|---|--------------------------------------|--|--------------------------------------|
| Programa | <input type="text"/> | Passo | <input type="text"/> |
| Tempo | <input type="text"/> | horas | <input type="text"/> |
| | | minutos | |
| Temperatura | <input type="text"/> | °C | Eventos |
| | | | Aquecimento |
| Pressão | <input type="text"/> | Torr | Plasma |
| | | | Gas |
| Corrente | <input type="text"/> | A | Ventilador |
| | | | Evento X |
| Gas H ₂ 1º | <input type="text"/> | sccm | Fim |
| | | | |
| Gas H ₂ 1º | <input type="text"/> | sccm | |
| | | | |
| Gas Ar | <input type="text"/> | sccm | |
| | | | |
| <input type="button" value="Confirma"/> | <input type="button" value="Edita"/> | <input type="button" value="Cancela"/> | <input type="button" value="Volta"/> |

Figura 30. Tela de programação do controlador de processo do reator PADS

Através do acesso aos botões virtuais da tela da IHM, o operador acessa os campos de inserção de valores para os parâmetros. São eles:

- Programa: 1 a 14;
- Passo: 1 a 20;
- Tempo: 0 a 99 horas e 0 a 59 minutos;
- Temperatura: 0 a 1450 °C;
- Pressão: 0 a 10 Torr;
- Corrente: 0 a 40 A;
- Gás H₂ 1º: 0 a 20.000 sccm;
- Gás H₂ 2º: 0 a 10.000 sccm;
- Gás Ar: 0 a 2.000 sccm;
- Aquecimento: 0 ou 1 (desligado ou ligado, respectivamente);
- Plasma: 0 ou 1;
- Gás: 0 ou 1;
- Ventilador: 0 ou 1;
- Evento X: 0 ou 1;
- Fim: 0 ou 1;
- Confirma: armazenamento do parâmetro ou programa;
- Edita: habilita edição do valor do(s) parâmetro(s);
- Cancela: cancela informação do parâmetro ou programa;
- Volta: saída da tela de programação do CLP;

Com estas informações, o controlador é capaz de, automaticamente, conduzir o ciclo proposto sem a intervenção humana.

Para a visualização dos valores dos parâmetros de processo, outras telas de visualização foram criadas, e algumas estão apresentadas no anexo 5.

8.2 Manual de operação do reator PADS

A operação do reator PADS requer o entendimento e treinamento sobre noções básicas de descargas de plasma e operação de fornos industriais.

Para o fácil entendimento do equipamento, bem como de sua operação, foi realizado um manual de operações do reator, o qual traz procedimentos e cuidados na operação do mesmo.

A seguir, são apresentados os principais pontos observados para a utilização do equipamento.

- Rotina para operação do equipamento (com o painel de controle ligado, equipamento aberto e com o carregamento das peças realizado):

- 1 – fechamento da câmara superior através do acionamento do eleva-car com o botão do controle (descer);
- 2 - fechamento dos grampos de fixação do reator;
- 3 - acionamento das bombas de vácuo;
- 4 – aguardar vácuo chegar a valores da ordem de 0,010 Torr;
- 5 – ligar fonte de plasma
- 6 – seleção do programa no CLP (já definido previamente);
- 7 - ligar chave contatora;
- 8 - colocação dos controladores de processo no modo automático e ligado;
- 9 - abertura da válvula manual de passagem de gás;
- 10 – *start* no CLP para início de processo;

Com estes dez procedimentos, o reator pode operar, em modo automático, durante todo o ciclo de processamento.

A operação dos controladores universais se dá de modo independente do CLP, porém, o valor de set point é disponibilizado pelo mesmo. Desta forma, é importante que quando da colocação do CLP no modo ligado, os controladores universais já estejam operando em modo automático, de forma que o valor de set point chegue aos controladores para o controle da rampa de aquecimento.

Os controladores universais (três) trabalham de modo independente um em relação aos outros dois, mesmo que o valor de set point seja o mesmo, entregue pelo CLP. Este controle independente permite o aquecimento do forno por zona, ou seja, cada controlador é responsável pelo aquecimento de uma zona, já que cada zona de aquecimento possui um termopar de controle próprio.

Cada controlador possui seu sistema de controle de parâmetros PID, de forma a ajustar a distribuição de potência térmica, por zona, em função da rampa de aquecimento e das perdas térmicas de cada fase. Cada controlador está ligado a um módulo de potência (tiristor), que por sua vez está integrado a um transformador elétrico.

O controle da potência de aquecimento é feito através de um sinal elétrico, enviado pelo controlador universal ao tiristor, que através de seu sistema de diodos, permite a passagem, de forma controlada, da corrente elétrica até os resistores elétricos, em função dos parâmetros PID disponibilizados..

Este aquecimento por zona permite um menor gradiente de temperatura ao longo do volume útil do equipamento, fazendo com que o resultado final das peças, em termos de variação dimensional, seja minimizado.

Todos os outros controles de parâmetros de processo do equipamento são realizados pelo CLP.

Os principais cuidados necessárias para o funcionamento do equipamento são:

- 1 – verificação, no início do ciclo, do nível de óleo das bombas de vácuo;
- 2 – verificação da não continuidade elétrica entre os eletrodos catodo e anodo, com o auxílio de um multímetro;
- 3 – verificação dos passos do programa desejado, na tela da IHM;

4 – verificação da posição da chave de acionamento do eleva-car, a qual deve estar no modo desligado;

5 – verificação do total fechamento dos grampos de fixação do reator;

6 – verificação da abertura das válvulas do sistema de resfriamento com água dos flanges, camisas d'água e passadores;

Durante o processo, o operador pode visualizar, em tempo real, os parâmetros de processamento a seguir:

- temperatura da zona superior de aquecimento;
- temperatura da zona intermediária de aquecimento;
- temperatura da zona inferior de aquecimento;
- temperatura de *set point* do forno;
- temperatura da parte exterior da mufla metálica do reator;
- pressão da câmara de processamento;
- corrente de plasma e tempo ligado da descarga de plasma (T_{on});
- tempo de processo e passo do programa;

O carregamento do forno com as peças se dá de forma manual, e o mesmo é realizado a partir de bandejas cerâmicas, as quais são inseridas sobre a estrutura anodo, carregadas com as peças injetadas.

A fácil utilização do equipamento é um requisito básico para a operacionalidade do mesmo, por pessoas de mão de obra não especializada, mas sim treinada e capacitada.

Um programa de manutenção preventiva foi realizado de forma a checar, periodicamente, a condição dos diversos sistemas e componentes presentes no reator PADS. Esta manutenção é semestral, e os registros de manutenção ficam afixados junto ao equipamento.

8.3 Especificações, montagens e desenhos técnicos dos componentes

Nesta seção é apresentada a lista de materiais dos componentes utilizados na construção do reator PADS,

Como o equipamento é de uso industrial e pertencente a uma empresa privada (Steelinject Injeção de Aços Ltda.) não é permitido apresentar os desenhos técnicos das peças e das montagens do equipamento.

Quanto as especificações do equipamento, pelo mesmo motivo apresentado acima não será apresentado nenhum dado dos equipamentos utilizados no reator PADS.

A apresentação dos componentes é feita a partir dos subgrupos do reator PADS, definidos durante o projeto em computador do mesmo (tabela 8).

O cronograma de execução do reator PADS é apresentado na figura 31.

No anexo 6 são apresentadas algumas vistas isométricas do reator PADS.

Tabela 8. Lista de peças do reator PADS..

| Nº | Sub Grupo | Peças | Quant. | Material | Fabricação |
|----|---------------------------------------|-------------------------------|--------|-------------------------|-------------------------------|
| 1 | Anel de isolamento das camisas d'água | anel de isolamento | 2 | aço carbono SAE 1020 | calandragem e solda |
| 2 | Anel inox 310 | anel | 1 | aço inoxidável AISI 310 | furação, dobra e solda |
| 3 | Ânodo | barra vertical | 8 | TZM | furação |
| | | barra longitudinal | 24 | TZM | furação |
| | | barra circular | 96 | TZM | rosqueamento |
| | | porca 1/4" | 144 | Molibdenio | - |
| | | porca 3/8" | 48 | Molibdenio | - |
| 4 | baratron | sensor de membrana capacitiva | 1 | - | BOC Edwards |
| 5 | Blindagem horizontal inferior | meia chapa menor | 2 | ML | Corte e furação |
| | | meia chapa menor | 6 | Molibdenio | Corte e furação |
| | | meia chapa maior | 10 | aço inoxidável AISI 304 | Corte e furação |
| 6 | Blindagem horizontal superior | meia chapa menor | 2 | ML | Corte e furação |
| | | meia chapa menor | 6 | Molibdenio | Corte e furação |
| | | meia chapa maior | 10 | aço inoxidável AISI 304 | Corte e furação |
| 7 | Blindagem vertical | chapa menor | 5 | ML | Corte e furação |
| | | chapa menor | 15 | Molibdenio | Corte e furação |
| | | chapa maior | 25 | aço inoxidável AISI 304 | Corte e furação |
| 8 | Booster e Bombas de vácuo | bomba mecânica | 1 | - | BOC Edwards |
| | | bomba roots | 1 | - | BOC Edwards |
| | | válvula controle de pressão | 1 | - | BOC Edwards |
| | | reductor de vibrações | 1 | - | BOC Edwards |
| 9 | Calota inferior externa | Calota inferior externa | 1 | aço carbono SAE 1020 | EICA |
| 10 | Calota inferior interna | Calota inferior interna | 1 | aço carbono SAE 1020 | EICA |
| 11 | Calota superior externa | Calota superior externa | 1 | aço carbono SAE 1020 | EICA |
| 12 | Calota superior interna | Calota superior interna | 1 | aço carbono SAE 1020 | EICA |
| 13 | Câmara inferior externa | Câmara inferior externa | 1 | aço carbono SAE 1020 | calandragem, solda e usinagem |
| 14 | Câmara inferior interna | Câmara inferior interna | 1 | aço carbono SAE 1020 | calandragem, solda e usinagem |
| 15 | Câmara superior externa | Câmara superior externa | 1 | aço carbono SAE 1020 | calandragem, solda e usinagem |
| 16 | Câmara superior interna | Câmara superior interna | 1 | aço carbono SAE 1020 | calandragem, solda e usinagem |
| 17 | Cátodo | barra vertical | 8 | TZM | furação |
| | | barra longitudinal | 28 | TZM | furação |
| | | barra circular | 224 | TZM | - |
| | | barra circular rosqueada | 28 | TZM | rosqueamento |
| | | porca 3/8" | 56 | Molibdenio | - |
| 18 | Cerâmicas de isolamento | macho | 60 | alumina | MACEA |
| | | fêmea | 60 | alumina | MACEA |
| 19 | Conectores camisa d'água | tubo | 24 | aço carbono SAE 1020 | usinagem e solda |
| | | espigão | 24 | aço carbono SAE 1020 | - |
| 20 | Elevacar | eleva-car | 1 | - | - |
| | | coluna de movimentação | 2 | aço carbono SAE 1020 | usinagem e solda |
| | | base | 2 | aço carbono SAE 1020 | usinagem e solda |
| 21 | Espaçadores cerâmicos | selo mecânico | 1120 | alumina | - |
| 22 | Estrela de fixação | cantoneira U | 10 | aço inoxidável AISI 304 | corte e usinagem |
| | | anel | 1 | aço inoxidável AISI 304 | calandragem e solda |
| | | pino | 1 | aço inoxidável AISI 304 | usinagem |
| 23 | Fixação da panela | suporte | 1 | aço carbono SAE 1020 | calandragem e usinagem |
| 25 | Fixação pinos Mo | barra vertical | 10 | aço inoxidável AISI 310 | dobra e usinagem |
| 26 | fixação plenum | conector | 2 | aço inoxidável AISI 310 | dobra e usinagem |

| | | | | | |
|----|------------------------------------|-----------------------------|-----|-------------------------|--------------------------------|
| 27 | Flange inferior | Flange inferior | 1 | aço carbono SAE 1020 | calandragem , sola e usinagem |
| | | anel de vedação | 2 | viton | - |
| 28 | Flange superior | Flange superior | 1 | aço carbono SAE 1020 | calandragem , sola e usinagem |
| 29 | flange termopar | cilindro maior | 2 | aço carbono SAE 1020 | corte |
| | | cilindro menor | 2 | aço carbono SAE 1020 | corte |
| | | flange | 2 | aço carbono SAE 1020 | usinagem |
| | | flange cego | 2 | aço carbono SAE 1020 | usinagem |
| | | parafuso | 12 | aço carbono SAE 1020 | - |
| | | porca | 24 | aço carbono SAE 1020 | - |
| | | anel de vedação menor | 36 | viton | - |
| | | anel de vedação maior | 2 | viton | - |
| | | arruela | 36 | aço carbono SAE 1020 | usinagem |
| | | tubo termopar | 12 | aço carbono SAE 1020 | - |
| 30 | Grampos de fixação | conector | 4 | - | Brasfixo |
| | | ceramica de isolamento | 16 | alumina | MACEA |
| 31 | Isolamento catodo | luva metalica | 8 | aço inoxidavel AISI 304 | usinagem |
| | | luva metalica intermediaria | 8 | aço inoxidavel AISI 304 | usinagem |
| 32 | manometro | manometro | 1 | - | - |
| | | valvula agulha | 1 | - | - |
| 33 | Panela | panela | 1 | aço carbono SAE 1020 | calandragem , solda e usinagem |
| 34 | Passador Catodo | conector | 1 | latao | - |
| | | tubo ceramico | 1 | alumina | - |
| | | passador | 1 | TZM | - |
| | | luva de isolamento | 1 | alumina | - |
| | | capsula | 1 | aço carbono SAE 1020 | usinagem |
| | | porca 3/8' | 1 | Molibdenio | - |
| | | anel de vedação | 4 | viton | - |
| | | arruela | 4 | aço carbono SAE 1020 | usinagem |
| 35 | Passadores de Energia | anel de aperto rosqueado | 1 | aço carbono SAE 1020 | usinagem |
| | | barra circular | 6 | Molibdenio | - |
| | | tubo ceramico | 6 | alumina | - |
| | | chapa retangular | 12 | TZM | usinagem |
| | | parafuso | 12 | Molibdenio | - |
| | | porca 1/4' | 30 | Molibdenio | - |
| | | anel de vedação | 18 | viton | - |
| | | arruela | 18 | aço inoxidavel AISI 304 | usinagem |
| | | base de apoio | 6 | aço inoxidavel AISI 304 | usinagem |
| | | anel de aperto rosqueado | 6 | aço inoxidavel AISI 304 | usinagem |
| 36 | Pés de fixação parte inferior | cantoneira U | 3 | aço carbono SAE 1020 | solda |
| 37 | Pinos blindagem inferior | barra circular menor | 10 | TZM | rosqueamento |
| | | barra circular maior | 14 | TZM | rosqueamento |
| | | porca 3/8' | 72 | Molibdenio | - |
| | | selo mecanico | 384 | alumina | - |
| 38 | Pinos blindagem inferior | barra circular menor | 10 | TZM | rosqueamento |
| | | barra circular maior | 14 | TZM | rosqueamento |
| | | porca 3/8' | 72 | Molibdenio | - |
| | | selo mecanico | 384 | alumina | - |
| 39 | Pinos fixação anteparos inferiores | pino | 14 | aço carbono SAE 1020 | usinagem e solda |
| 40 | Pinos Mo | pino rosqueado maior | 60 | Molibdenio | - |
| | | pino rosqueado menor | 20 | Molibdenio | - |
| 41 | plenum | tubo furado | 2 | Molibdenio | - |
| | | conector | 1 | aço inoxidavel AISI 304 | usinagem |
| 42 | Porcas Mo | porca 3/8' | 200 | Molibdenio | - |
| 43 | Reforços panela | chapa em ângulo | 10 | aço carbono SAE 1020 | corte e solda |

| | | | | | |
|----|--------------------------------|-----------------------|------|-------------------------|---------------------------|
| 44 | Resistores | resistor | 6 | ML | - |
| 45 | Sistema fixação eletrodos | cantoneira U | 2 | aço inoxidável AISI 304 | usinagem |
| | | tubo | 2 | aço carbono SAE 1020 | corte e solda |
| 46 | Suporte resistores | base | 60 | Molibdenio | usinagem e dobra a quente |
| | | arruela | 60 | Molibdenio | usinagem |
| | | encosto | 60 | Molibdenio | usinagem e dobra a quente |
| | | arame | 10 m | Molibdenio | - |
| 47 | Tubos resfriamento forçado | tubo | 15 | Molibdenio | - |
| 48 | Tubos resfriamento o'rings | tubo | 6 | aço carbono SAE 1020 | usinagem |
| 49 | Tubulação resfriamento forçado | válvula gaveta | 1 | - | - |
| | | trocador de calor | 1 | - | - |
| | | ventilador | 1 | - | - |
| | | tubulação | 1 | aço carbono SAE 1020 | solda |
| | | redução | 1 | aço carbono SAE 1020 | solda |
| 50 | Tubulação vácuo | flange | 2 | aço carbono SAE 1020 | usinagem |
| | | tubo | 1 | aço carbono SAE 1020 | usinagem |
| 51 | Visor e flange | tubo | 1 | aço carbono SAE 1020 | usinagem |
| | | flange | 2 | aço carbono SAE 1020 | usinagem e solda |
| | | anel de vedação | 1 | viton | - |
| | | vidro de visualização | 1 | quartzo | - |
| | | parafuso | 6 | aço carbono SAE 1020 | - |
| | | porca | 6 | aço carbono SAE 1020 | - |

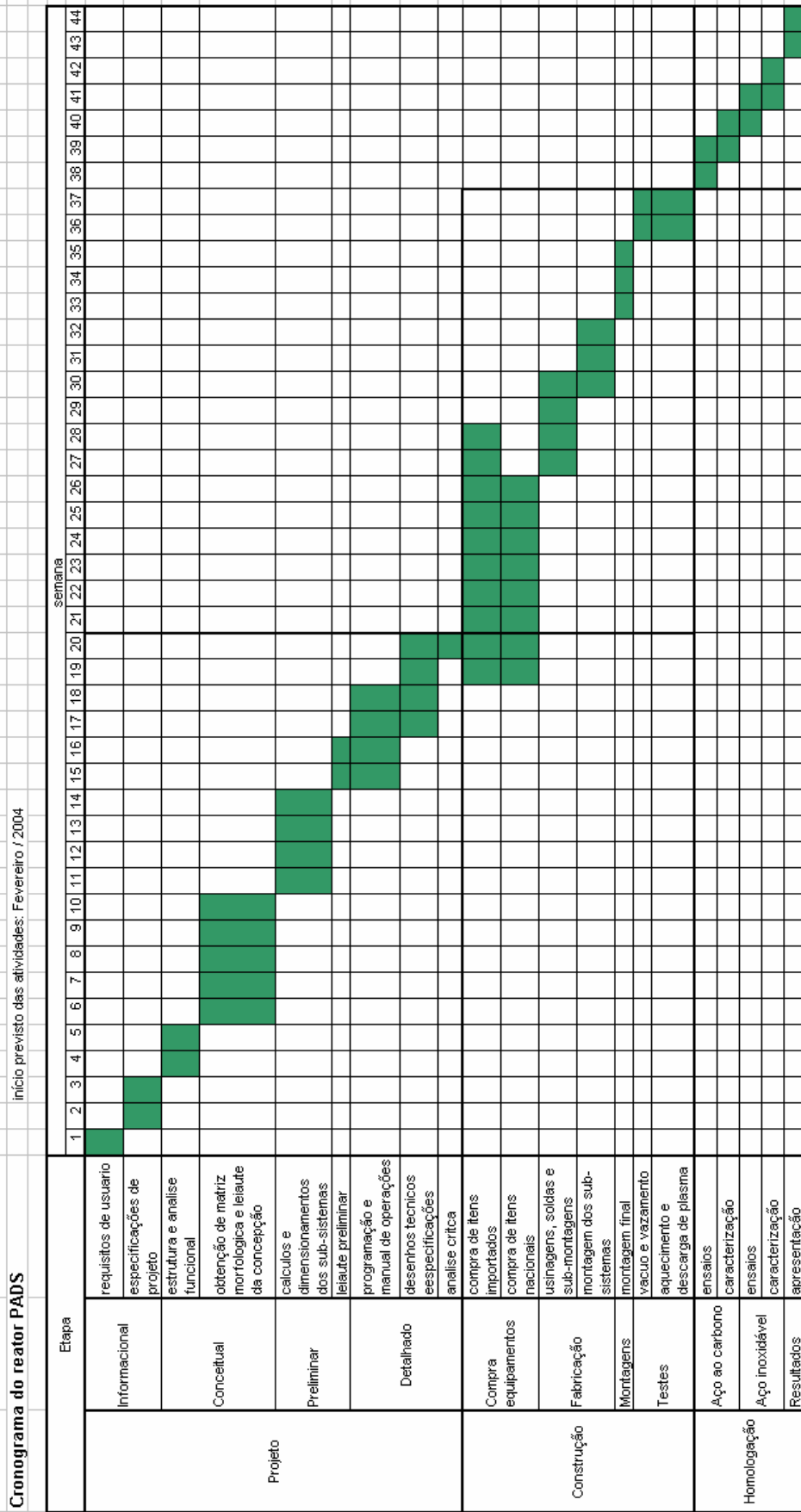


Figura 31. Cronograma do reator PADS.

9. Construção e testes do reator

De posse de toda a documentação referente ao projeto, foi dado início à etapa de construção do reator. Após a compra dos componentes necessários (nacionais e/ou importados), iniciou-se a fabricação e montagem dos sub-sistemas do equipamento.

9.1 Montagem da estrutura mecânica e mufla térmica

A seqüência de fabricação e montagem do sistema mecânico foi feito na seguinte seqüência:

1. calandragem das chapas das paredes interna e externa, superior e inferior, das câmaras do forno;
2. usinagem e soldagem das barras de fixação da mufla na parte interna da câmara superior interna;
3. compra e posterior soldagem das calotas interna e externa, superior e inferior, nas câmaras verticais do forno;
4. calandragem e soldagem dos anéis de divisão para as camisas d'água, entre as partes vertical e calotas, nas câmaras superior e inferior;
5. usinagem e soldagem dos flanges inferior e superior, nas câmaras inferior e superior, respectivamente;
6. usinagem, soldagem e montagem da fixação da panela e da panela, na parte inferior da câmara interna;
7. usinagem e soldagem dos pés de fixação na câmara externa inferior;
8. retífica plana dos flanges superior e inferior;

9. usinagem dos flanges para o sistema de vácuo, passadores de energia, equipamentos de controle, termopares e passagens de água para as camisas d'água;
10. soldagem dos flanges nas câmaras superior e inferior;
11. soldagem dos grampos de fixação no flange inferior;
12. usinagem e soldagem dos pinos de fixação para o sistema de elevação da câmara superior;
13. pintura com tinta de fundo para proteção contra ferrugem;

Após concluída a etapa de fabricação da estrutura mecânica do equipamento (operação realizada em empresa externa, especializada na fabricação de vasos de pressão) a mesma seguiu para a empresa Steelinject, onde foi colocada no setor de fornos, para demais montagens.

O sistema de elevação (eleva-car comercial) foi adaptado ao equipamento, quanto aos seus braços de fixação, para a sustentação da câmara superior. Os pinos-guia foram soldados nas colunas do elevador, e em seguida, o forno foi alinhado em relação ao sistema de elevação, para encaixe.

A tubulação para o sistema de vácuo e resfriamento (fornecida soldada conforme desenho) foi montada, com o auxílio de flanges, vedações herméticas e uniões aparafusadas. Depois de inseridos os trocadores de calor, válvulas para gerenciamento dos gases, curvas e reduções, ventilador, o grupo de bombas de vácuo (fixas por uma estrutura metálica já existente) foi instalado, concluindo desta forma todo o circuito de gases do equipamento.

Uma estrutura mecânica composta por vigas I verticais e uma plataforma retangular (com seção em tubo quadrado) foi construída para a sustentação dos transformadores elétricos (trafos), acima do forno. Em seguida, os transformadores elétricos foram alocados sobre a estrutura, com o auxílio de uma máquina empilhadeira.

A mufla térmica foi montada, parte fora do forno, parte dentro do forno, em função de seu método de fixação na câmara superior (uniões aparafusadas).

Uma chapa em aço AISI 304 com espessura de 4 mm foi usinada (furação), calandrada e soldada, para servir de estrutura de fixação para todas as blindagens térmicas, pinos, resistências, isoladores elétricos e suas fixações. Após, a mesma foi fixada na câmara

superior, por meio de barras rosqueadas em Mo e porcas em aço inoxidável. Na seqüência, as blindagens térmicas foram adicionadas, uma a uma, já dentro do reator.

As peças da mufla em aço inoxidável e/ou molibdênio foram previamente obtidas, por usinagem e/ou conformação mecânica à quente, para após montagem da mufla térmica.

As chapas das blindagens verticais, de 0,5 mm de espessura em aço inoxidável e molibdênio, foram usinadas e dobradas (em forma de arcos) para montagem das camadas consecutivas de blindagens térmicas.

Cada blindagem foi obtida a partir de 5 chapas dobradas (72° cada), e estas foram fixadas na estrutura em aço inoxidável através de seus pinos em Mo, por meio de arruelas e porcas de molibdênio. Entre cada blindagem, um espaçador cerâmico de 7 mm de espessura foi inserido, para evitar o contato entre as blindagens, o que diminui a eficiência da retenção de calor na parte quente da mufla térmica.

A blindagem foi obtida a partir de cinco blindagens em aço inoxidável AISI 304, três blindagens em molibdênio e uma blindagem em ML.

As blindagens horizontais, superior e inferior, seguiram o mesmo procedimento das blindagens verticais, quanto a sua montagem. Todas as furações das chapas foram feitas a partir de desenhos obtidos em CAD, em corte a laser.

Concluída a montagem dos pinos, os isoladores cerâmicos dos resistores elétricos e suportes das resistências, em molibdênio, foram inseridos sobre os pinos de molibdênio (dez por posição radial, seis por porção vertical), e fixos por meio de arruelas e porcas, também em molibdênio.

Por fim, as resistências em ML (seis) foram inseridas e fixadas nos suportes das mesmas (base) e arame de molibdênio (sustentação) com diâmetro de espessura 1 mm.

A conexão das resistências com os cabos elétricos (na parte externa do equipamento) foi realizada a partir de barras circulares, em molibdênio, com espessura de 25 mm. O isolamento elétrico destes passadores foi realizado com tubos em alumina densa e pura, circunscritos aos passadores elétricos.

Na região central da face interior da barra circular em Mo (3/8”), foi usinada uma rosca para a inserção de uma barra rosqueada (em Mo), de forma a esta fazer o contato elétrico, por meio de chapas e uniões aparafusadas, todas em molibdênio, com as resistências elétricas.

Na parte externa dos passadores de corrente (e do forno), o contato elétrico com os cabos elétricos foi obtido a partir de uma peça em latão, com dos parafusos em aço ao carbono, para aperto e garantia de bom contato elétrico.

A vedação dos passadores de corrente com o meio externo foi feito a partir de anéis de vedação em Viton ®, dentro de um flange com camisa d'água para arrefecimento dos mesmos.

Os eletrodos para a obtenção da descarga de plasma catodo e anodo foram obtidos a partir de barras de seção retangular e circular de molibdênio (importadas).

Estas barras foram usinadas a partir de parâmetros de fresamento, torneamento e furação, fornecidos pelo fornecedor destes produtos semi-acabados (fornecedor Plansee).

As montagens das estruturas de eletrodos foram feitas a partir de uniões aparafusadas, e o isolamento dos catodos foi feita com a utilização de peças cilíndricas maciças em alumina densa e pura, com o auxílio de luvas em aço inoxidável, para a não metalização da cerâmica com a descarga de plasma.

As fotografias abaixo ilustram algumas das etapas de construção do reator PADS (figura 32 a 43).



Figura 32. Montagem das câmaras do reator com o eleva-car.



Figura 33. Montagem do sistema de vácuo e trocadores de calor.



Figura 34. Parte interna da câmara superior – estrutura de fixação da mufla térmica.

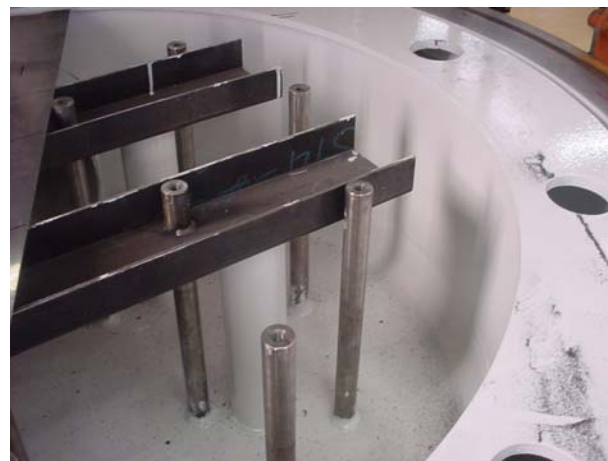


Figura 35. Panela de fixação dos eletrodos e blindagem térmica inferior.



Figura 36. Mufla térmica do reator PADS.



Figura 37. Ventilador para resfriamento forçado e painel de controle.



Figura 38. Estrutura para disposição dos transformadores elétricos.



Figura 39. Mufla térmica – resistores elétricos e sua fixação.

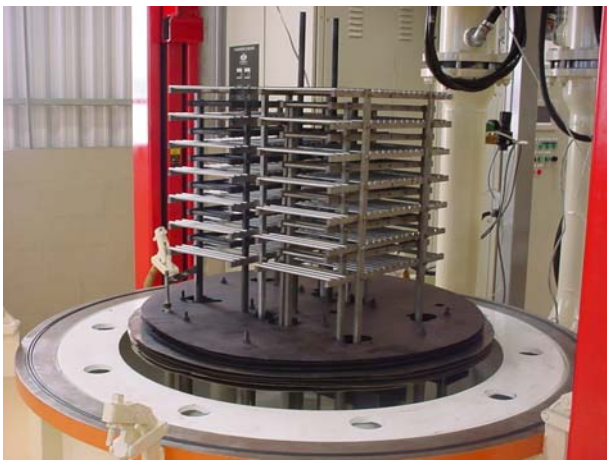


Figura 40. Eletrodos e blindagem térmica inferior.



Figura 41. Reator PADS aberto, com a fonte de plasma ao lado (esquerdo).



Figura 42. Reator PADS..



Figura 43. Reator PADS fechado, com a fonte de plasma ao lado (esquerdo).

9.2 Montagem do sistema elétrico/eletrônico

O sistema elétrico/eletrônico foi projetado e construído com o auxílio de uma empresa especializada em automação industrial (fornecedor Motiontech). A plataforma elétrico/eletrônica utilizada no equipamento foi Siemens ®.

O sistema de controle do equipamento foi feito a partir de um CLP (controlador lógico programável). A partir deste controlador, todos os sinais de entrada e saída para o gerenciamento do equipamento foram inseridos, a partir de entradas e saídas analógicas e digitais.

O sistema elétrico (aquecimento resistivo) foi obtido na seguinte seqüência:

1. inserção dos trafos na plataforma superior do equipamento e ligação com a rede elétrica de 380 V;
2. colocação de chaves contadoras para os transformadores elétricos;

3. colocação dos módulos de potência para cada fase de aquecimento (um por transformador);

4. colocação de fusíveis ultra-rápidos na saída do módulos de potência;

5. ligação com barramento em cobre e cabos elétricos em feixe de fios de cobre desde os transformadores elétricos até os terminais em Mo;

A fonte de plasma (corrente elétrica contínua pulsada), bem como seu transformador isolador, foi alocada ao lado do equipamento, assim como o painel de controle do mesmo. O bloco *manifold* com os fluxímetros de gases de processo foi alocado sobre o painel de controle.

O painel de controle foi recebido definido a partir das necessidades solicitadas ao integrador. Chegando à empresa, os sinais foram conectados desde os sensores até o CLP. Os sinais inseridos (entradas e saídas) no CLP foram:

1. termopares (entradas analógicas);
2. membrana capacitiva (entrada analógica);
3. fluxímetros (saídas analógicas);
4. sensor de pressão atmosférica (entrada analógica);
5. módulos de potência (saída analógica);
6. bombas de vácuo (saída digital);
7. válvula controladoras depressão (saída analógica)
8. válvula gaveta (saída digital);
9. ventilador (saída digital);
10. corrente de plasma (entrada e saída analógica)
11. chaves contatoras (saída digital);
12. eleva-car (saída digital);

O programa do controlador de processo foi obtido a partir do integrador, o qual utilizou linguagem de programação em blocos, a partir das características de processo

solicitadas ao mesmo. A interface entre o controlador e o operador foi feita a partir de uma interface homem-máquina (IHM).

9.3 Interface homem-máquina (IHM)

A programação e gerenciamento do processo foram disponibilizados a partir de uma interface homem-máquina. Esta interface é caracterizada pela interação a partir de uma tela com sistema *touch-screen* (toque na tela).

A partir de toques na tela da IHM, o operador habilita funções e funcionamento do forno, bem como edita parâmetros de programas. Este equipamento possui uma interface simples com o operador, sendo fácil de ser operada.

Este gerenciador foi interfaceado ao CLP (saída digital), sendo este o sistema de edição/visualização entre o equipamento e o operador.

9.4 Testes de vácuo e vazamento

Depois de concluídas todas as montagens, os testes quanto ao funcionamento do equipamento foram realizados.

Os primeiros testes realizados foram os de vácuo final e vazamento (ar).

Os testes de vácuo foram realizados a partir do bombeamento do gás (ar atmosférico) presente dentro de todo o volume contido no sistema antes das bombas de vácuo.

O tempo de evacuação para o alcance da pressão final mínima atingida pelo grupo de bombas de vácuo foi de aproximadamente 7 minutos. Após este tempo, a pressão atingida foi de 0,025 Torr.

Esta pressão é muito próxima à pressão mínima alcançada pelo sistema, de 0,010 Torr (dado de fabricante). Este valor de pressão foi considerado satisfatório, levando-se em consideração as perdas de carga introduzidas no equipamento.

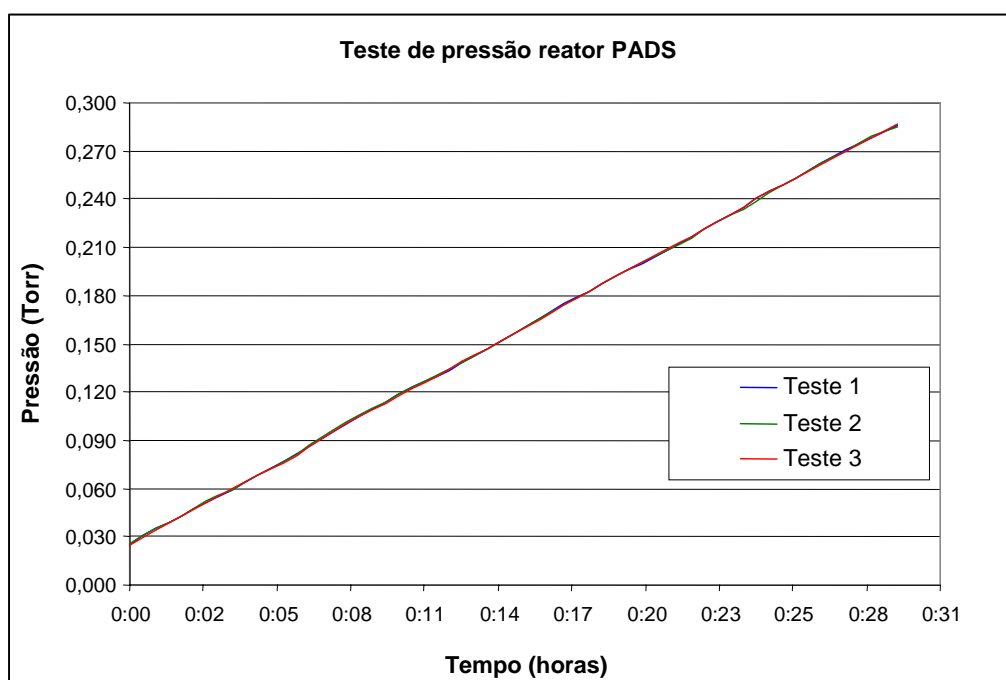


Figura 44. Resultados de vácuo final e vazamento do reator PADS.

Os testes de vazamento foram realizados logo após o alcance da pressão negativa máxima. A válvula gaveta foi fechada, e após, as bombas de vácuo foram desligadas. Com isso, foi possível avaliar o nível de estanqueidade do equipamento.

A partir do sensor de pressão de membrana capacitiva, a taxa de entrada de ar atmosférico por unidade de tempo (Torr/min) foi avaliada.

Os resultados mostraram um vazamento de 0,009 Torr/min, de forma linear. Assim, o mesmo foi considerado estanque para as pretensões do equipamento, quanto aos materiais metálicos sugeridos para processamento (figura 44).

9.5 Testes preliminares de aquecimento e descarga de plasma

Por fim, os últimos testes realizados antes da homologação do reator com os lotes de peças foram os testes de aquecimento resistivo e descarga de plasma (em modo separado e simultâneo).

Os testes de descarga de plasma foram realizados sob uma tensão de pico de 480 V, com variação da pressão entre 0,5 e 8 Torr (com gás hidrogênio e/ou argônio), com variação de corrente entre 1 e 15 A. Estes testes foram realizados com o objetivo de visualizar, a partir do visor em vidro, eventuais arcos voltaicos. Os arcos voltaicos foram presenciados somente em pressões acima de 7,5 Torr com descarga de argônio puro (condição extrema e nunca utilizada em condições normais de processo).

Assim, a estrutura de eletrodos bem como a descarga de plasma foi considerada satisfatória para as necessidades do equipamento (1 Torr com corrente menor do que 5 A em descarga de H₂ puro).

Os testes de aquecimento foram realizados de duas formas. Uma primeira etapa em modo manual (incremento de potência manual) e em seguida em modo automático (a partir de um controle PID (potencial, integral e derivativo)).

Os testes em manual foram feitos a partir de incrementos adicionados pelo operador, por meio do controlador universal Novus[®]. Os acréscimos foram feitos de 0,5 em 0,5 % sobre o valor percentual definido de 0 a 100 % possível.

O percentual de potência mínimo para o disparo dos resistores foi de 5,6 %, valor este que energiza os tiristores dos módulos de potência. A partir deste valor, cada zona foi aquecida com o incremento mencionado, até o atendimento de uma temperatura de 1350°C, temperatura esta que foi atingida com um percentual de potência de saída de 65%.

Com isso foi limitado, eletronicamente o percentual máximo de saída de potência para os módulos de potência em 65%, de forma a evitar a saturação magnética dos trafos, bem como evitar uma corrente demasiadamente alta sobre os tiristores (corrente máxima observada: 850 A).

Os testes em modo automático foram mais complexos, devido ao comportamento não-constante da resistividade elétrica do molibdênio. Este metal, em baixas temperaturas,

apresenta uma resistividade elétrica muito baixa ($0,075 \mu\Omega\text{m}$), o que proporciona a passagem de altas correntes sobre o resistor elétrico em Mo quase como um curto circuito.

Desta forma, se não houver uma limitação de corrente sobre os resistores elétricos, estes são energizados com correntes muito altas, o que danifica os componentes eletrônicos do sistema.

Em temperaturas acima de 1200°C , a resistividade elétrica do molibdênio é 10 vezes maior que a observada em temperatura ambiente, logo o mesmo se comporta como um resistor, sendo necessário nesta faixa de temperatura um aporte de corrente elétrica elevada para o aquecimento do volume de controle desejado.

Assim, um controle de saída de potência rigoroso foi definido para a não geração de problemas elétrico/eletrônicos no equipamento.

A solução implementada foi a utilização de um sistema PID, onde através dos parâmetros proporcional, integral e derivativo, foi possível entregar aos resistores elétricos a potência necessária para o aquecimento adequado durante cada etapa de processo.

Adicionalmente, um parâmetro *soft-start* (partida suave) foi inserido para o início dos ciclos. Esta função permite que durante o início do aquecimento, o percentual máximo de potência de saída permitido entregue ao sistema seja atingido em um determinado intervalo de tempo (programado).

Esta função foi mais uma proteção eletrônica adicionada ao equipamento, para evitar picos de corrente elétrica em baixas temperaturas.

Com isso, o aquecimento em modo automático foi realizado até temperaturas da ordem de 1350°C , com limitação de corrente em 65%, de modo individual para cada zona de aquecimento (cada zona de aquecimento tem seu termopar de controle de temperatura).

A taxa de aquecimento empregada em temperaturas acima de 800°C foi $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$. O percentual de potência de saída observado foi 65%, limitado eletronicamente.

Depois de concluídos os testes de aquecimento, testes de aquecimento resistivo e de descarga de plasma em modo simultâneo foram realizados, para a verificação de uma eventual e indesejada interação entre os dois sistemas elétricos. Os testes não mostraram nenhum tipo de interação elétrica entre eletrodos e resistores elétricos ou problemas entre as resistências de molibdênio e a estrutura catodo anodo, sendo aprovado em teste o funcionamento híbrido do sistema.

As figuras entre 45 e 48 ilustram os testes realizados no forno PADS.

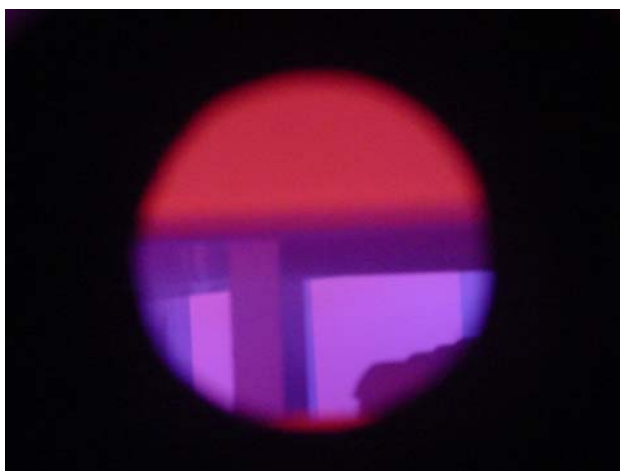


Figura 45. Reator PADS com descarga de plasma na faixa de temperatura de 600 °C.

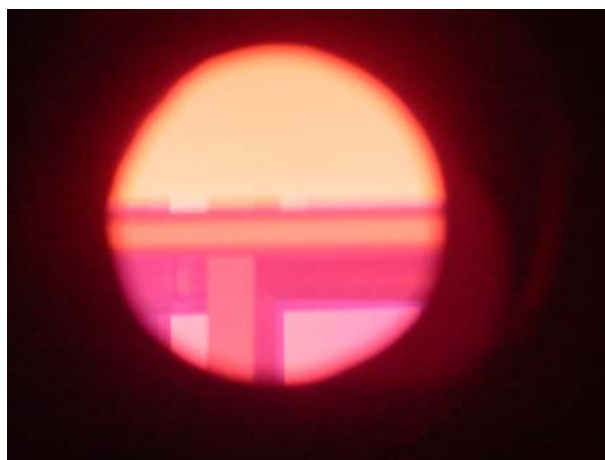


Figura 46. Reator PADS com descarga de plasma na faixa de temperatura de 950 °C.



Figura 47. Reator PADS na temperatura de 1350 °C.

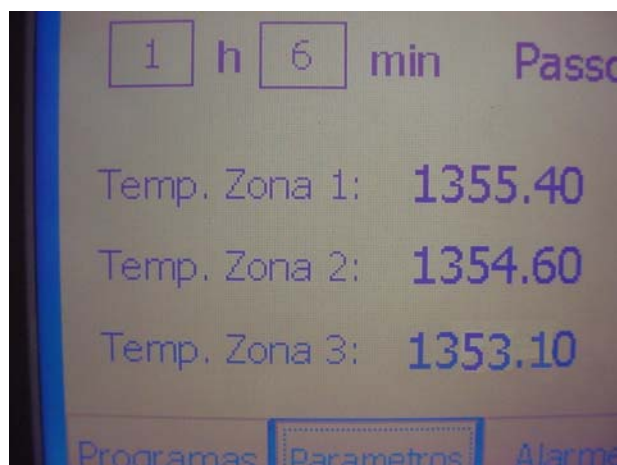


Figura 48. Temperaturas das diferentes zonas de aquecimento para *set point* de 1350 °C.

10. Homologação do reator

Após os testes de verificação de funcionamento dos sistemas do equipamento, os ciclos com carga de peças foram realizados a partir dos parâmetros de processamento obtidos previamente do reator em escala piloto do LabMat (UFSC).

Os testes com lotes de peças foram realizados em dois materiais: aço ao carbono baixa liga Fe₂Ni_{0,6}C e aço inoxidável austenítico, AISI 316-L. A massa dos lotes de peças processados variaram entre 10 e 12 kg. Para cada tipo de material avaliado, três ciclos de processamento foram realizados.

10.1 Testes com aços ao carbono

Os resultados dos ciclos de homologação para o aço carbono avaliado estão apresentados sob três características:

1. Condições de processamento e avaliação dos ciclos, bem como avaliação da integridade do equipamento após os ciclos produtivos;
2. Caracterização físico-mecânica das peças;
3. Comportamento dimensional dos lotes de peças;

O ciclo de processamento dos aços ao carbono foi projetado a partir das informações obtidas do reator piloto, bem como a partir dos parâmetros de sinterização intrínsecos da liga Fe₂Ni_{0,6}C.

O perfil do gráfico com os parâmetros de controle de processo é apresentado a seguir, na figura 49. A taxa de aquecimento utilizada na etapa de extração de ligantes foi 1°C/min. A partir do fim da extração de ligantes, uma taxa de aquecimento de 10 °C/min foi empregada até a temperatura de patamar de sinterização, 1250 °C. Após, o

resfriamento foi realizado de forma natural até 700 °C, quando então o resfriamento com ventilação forçada teve início.

Os parâmetros de processo empregados no ciclo de processamento do aço ao carbono estão apresentados na tabela 9.

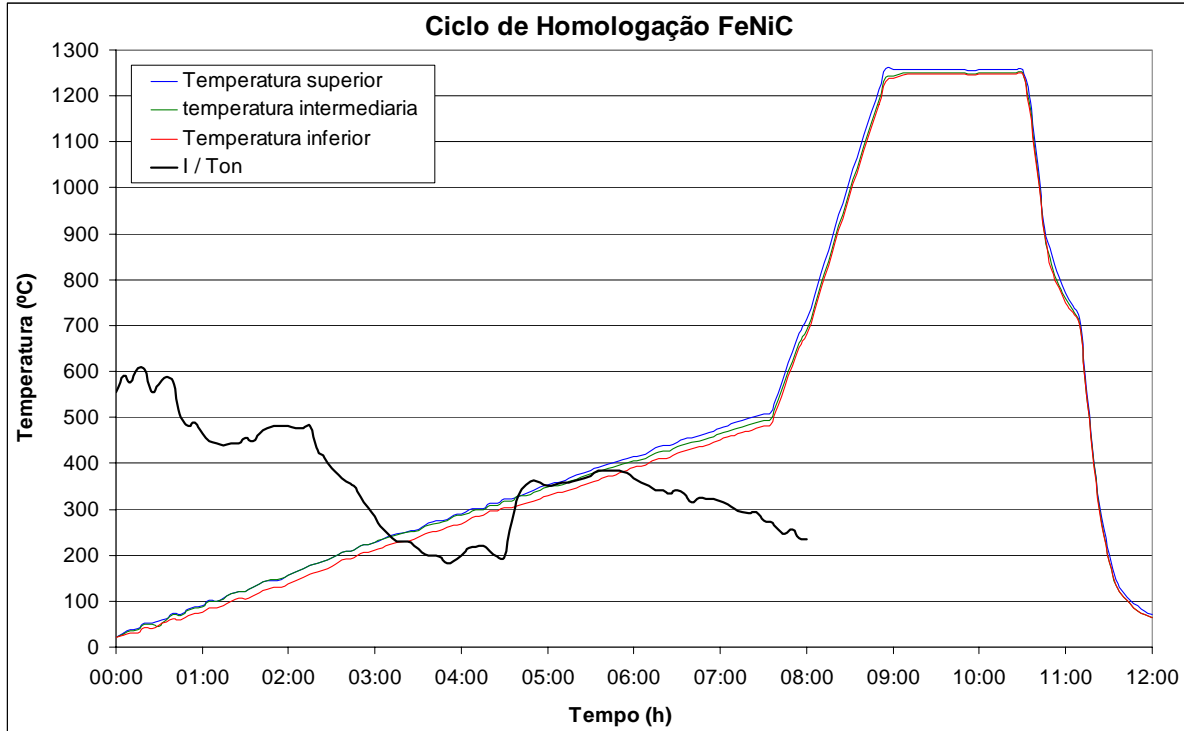


Figura 49. Perfil do gráfico de processamento da liga Fe₂Ni_{0,6}C via PADS.

Tabela 9. Parâmetros de processamento para a liga Fe₂Ni_{0,6}C via PADS

| Passo | Temperatura (°C) | Tempo (h) | Pressão (Torr) | Corrente de plasma (A) | Hidrogênio (sccm) | Argônio (sccm) |
|-------|------------------------|-----------|----------------|------------------------|-------------------|----------------|
| 1 | T _{amb} - 240 | 03:15 | 1 | 4 | 20000 | 0 |
| 2 | 240 - 500 | 04:20 | 1 | 2,8 | 20000 | 0 |
| 3 | 500 - 700 | 00:35 | 1 | 2,8 | 20000 | 0 |
| 4 | 700 - 1250 | 00:50 | 1 | 0 | 0 | 2000 |
| 5 | 1250 | 01:30 | 1 | 0 | 0 | 2000 |
| 6 | 1250 - 700 | 00:40 | 1 | 0 | 0 | 2000 |
| 7 | 700 - 65 | 00:50 | 760 | 0 | 0 | - |

O perfil de processamento, para o comportamento do plasma caracteriza-se pela razão I/T_{on}, ou seja, a corrente de plasma utilizada sobre o tempo efetivamente ligado da descarga de plasma.

Esta razão fornece a taxa de elétrons utilizados para o processamento dos materiais, ou seja, do bombardeamento de elétrons secundários sobre a superfície das peças, sob o potencial flutuante. Quanto menor a razão I/T_{on} , maior a quantidade de elétrons utilizados para a quebra das cadeias de polímeros presente nos componentes injetados.

Pelo gráfico da figura 49 é possível observar que a faixa compreendida entre as temperaturas de 240 e 320 °C é aquela onde ocorre a extração dos polímeros presentes nos componentes injetados, devido a queda acentuada da razão I/T_{on} . Esta queda é fundamentada pelo fato de que, para a mesma corrente de plasma de *set point* (2,8 A), o tempo ligado (T_{on}) sobe, de forma a manter a corrente programada dentro do valor programado (I_{cte}). Esta elevação no tempo ligado se dá devido ao consumo dos elétrons secundários para o bombardeamento dos polímeros. Desta forma, um maior tempo ligado é necessário para manter a descarga de plasma dentro do parâmetro pré-estabelecido (2,8 A).

A partir da temperatura de 320 °C, a razão começa a aumentar novamente, mostrando que o consumo de elétrons para a extração de ligantes foi finalizado, o que evidencia o fim da etapa de extração de ligantes.

O segundo ponto de queda da razão I/T_{on} deve-se ao comportamento dos gases segundo a relação $PxV = nxRxT$, pois com o aumento da temperatura, e mantendo-se a pressão e o volume constantes dentro do sistema, a quantidade de moléculas diminui ($R =$ constante universal dos gases), para a manutenção do equilíbrio do sistema.

A partir de 700°C, a descarga de plasma é desligada e a atmosfera de processamento é alterada de hidrogênio para argônio, de forma a evitar a descarbonetação do aço ao carbono processado, até sua temperatura de patamar de sinterização e posterior resfriamento.

Após a finalização dos três ciclos de homologação para o aço ao carbono, não foi verificada a presença de fuligem sobre as peças e/ou placas cerâmicas, bem como não foi observada borra polimérica nas partes frias do reator. Esta observação constatou a limpeza no ambiente de processamento. Nenhum defeito ou problema foi verificado após os ciclos de processamento.

A caracterização físico-mecânica foi realizada de forma amostral, para as características densidade, teor de carbono e microdureza.

Para cada ciclo de processamento foram avaliadas, para cada característica, 48 peças, sendo 2 amostras para cada bandeja (uma central e outra periférica sobre a placa), em um total de 24 bandejas (480 peças processadas por ciclo).

Os valores de densidade mensurados para os três ciclos de processamento são apresentados na tabela 10.

Tabela 10. Avaliação de densidade (método de Arquimedes) para os ciclos de processamento para a liga Fe₂Ni_{0,6}C (48 peças por lote).

| Densidade (g/cm ³) | | | | |
|--------------------------------|--------------|--------------|-------------|---------------|
| Ciclo | Valor mínimo | Valor máximo | Valor médio | Desvio padrão |
| 1 | 7,522 | 7,565 | 7,542 | 0,008 |
| 2 | 7,520 | 7,567 | 7,541 | 0,009 |
| 3 | 7,526 | 7,561 | 7,548 | 0,009 |

O comportamento de densidade foi homogêneo, devido ao baixo gradiente de temperatura encontrado no forno PADS. A densidade média de 7,54 g/cm³ reflete uma densificação de 95,7 % se comparado à densidade cristalográfica da liga (7,88 g/cm³). Todos os valores permaneceram acima de 95% de densidade relativa, o que valida o processo em relação a característica densidade [27].

O teor de carbono presente nas peças após o processamento é apresentado na tabela 11.

Tabela 11. Teor de carbono para os ciclos de processamento para a liga Fe₂Ni_{0,6}C (48 peças por lote).

| Teor de carbono (% massa) | | | | |
|---------------------------|--------------|--------------|-------------|---------------|
| Ciclo | Valor mínimo | Valor máximo | Valor médio | Desvio padrão |
| 1 | 0,5250 | 0,6774 | 0,615 | 0,064 |
| 2 | 0,5711 | 0,6395 | 0,605 | 0,018 |
| 3 | 0,5012 | 0,5778 | 0,543 | 0,027 |

A homogeneidade do teor de carbono foi maior para os dois últimos lotes de processamento, porem, para o terceiro lote, os valores nominais foram menores. Esta

variação pode estar associada a eficiência da extração química existente entre os lotes. Porém, a variação está dentro da faixa admissível para a liga, entre 0,5 e 0,7 %C em massa [27].

O comportamento de microdureza (Vickers 0,2 kg) é apresentado na tabela 12.

Tabela 12. Microdureza Vickers para os ciclos de processamento para a liga Fe₂Ni_{0,6}C (48 peças por lote).

| Microdureza (HV 0,2 kg) – 3 medições por peça | | | | |
|---|--------------|--------------|-------------|---------------|
| Ciclo | Valor mínimo | Valor máximo | Valor médio | Desvio padrão |
| 1 | 168 | 192 | 180 | 10 |
| 2 | 161 | 195 | 178 | 12 |
| 3 | 159 | 188 | 172 | 11 |

O comportamento de microdureza foi semelhante ao teor de carbono. Este comportamento é esperado, uma vez que o % de carbono influencia a dureza do componente sinterizado. A microestrutura formada foi ferrítico-perlítica, uma vez que o aço processado é hipoeutetóide.

Na verificação da microestrutura, a variação microestrutural entre o núcleo e a periferia da peça (devido a um possível gradiente do teor de carbono) é inexistente (Figura 50). Ainda, o valor de microdureza, pode ser elevado, se desejado, a valores da ordem de 750 HV 0,2 kg após tratamento térmico de têmpera e revenimento.



Figura 50. Micrografia do aço Fe₂Ni_{0,6}C produzido no reator PADS.

Na foto 51 é possível identificar um lote de peças em aço ao carbono no reator PADS após o seu processamento.

O comportamento dimensional dos ciclos em aço ao carbono foi avaliado quanto a variação e dispersão de processo encontradas para as dimensões mensuradas.



Figura 51. Peças processadas em aço ao carbono no reator PADS.

As cotas avaliadas para a peça analisada foram: diâmetro externo, diâmetro intermediário e diâmetro interno. Uma foto da peça processada é apresentada na figura 52.

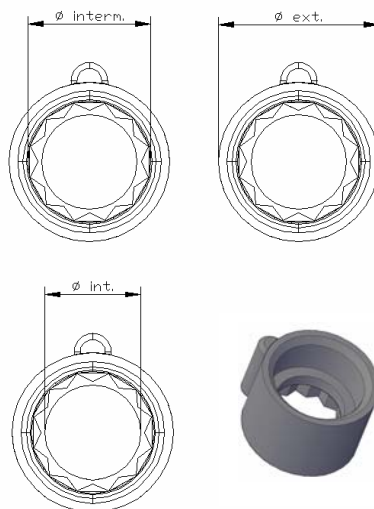


Figura 52. Foto do componente processado na liga Fe₂Ni_{0,6}C e cotas.

O processo consistiu na medição de 40 peças (por ciclo de processamento). O resultado dimensional dos ciclos de processamento é apresentado na tabela 13.

Tabela 13. Comportamento dimensional para os ciclos de processamento para a liga Fe₂Ni_{0,6}C (40 peças por lote).

| Valores em mm | | ciclo | ciclo | ciclo |
|------------------------|---------------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| Diâmetro externo | mínimo | 14,69 | 14,55 | 14,57 |
| | máximo | 14,84 | 14,66 | 14,68 |
| | média | 14,75 | 14,61 | 14,63 |
| | desvio padrão | 0,039 | 0,030 | 0,030 |
| Diâmetro intermediário | mínimo | 21,98 | 21,74 | 21,71 |
| | máximo | 22,17 | 21,84 | 21,85 |
| | média | 22,06 | 21,80 | 21,80 |
| | desvio padrão | 0,046 | 0,030 | 0,036 |
| Diâmetro interno | mínimo | 17,36 | 17,23 | 17,24 |
| | máximo | 17,54 | 17,37 | 17,40 |
| | média | 17,43 | 17,28 | 17,31 |
| | desvio padrão | 0,051 | 0,031 | 0,031 |

A partir dos valores apresentados na tabela 12 é possível observar um baixo desvio padrão para as dimensões avaliadas. Quanto a variação percentual observada, a tabela 14 traz os valores percentuais e uma comparação com o valor típico de variação dimensional para o processo *MIM* ($\pm 0,3\%$).

A variação percentual encontrada está ligeiramente acima àquela definida como típica para o processo. Como a peça avaliada sob uma calibração para a correção da ovalização associada a geometria da peça e ponto de injeção, estes valores de variação percentual estão dentro de um valor aceitável para o componente processado.

O comportamento do ciclo 1 é o pior em relação a variação dimensional. Este fato pode estar associado ao maior gradiente de temperatura encontrado no patamar de sinterização. Após esta verificação ao término do ciclo 1, os parâmetros PID foram alterados de forma a reduzir o gradiente em altas temperaturas, o que confirma-se como positivo através da variação dimensional encontrada para os ciclos 2 e 3.

Tabela 14. Variação percentual das dimensões avaliadas para os ciclos de processamento para a liga Fe₂Ni_{0,6}C (40 peças por lote).

| Valores % (\pm) | | ciclo | ciclo | ciclo |
|------------------------|-------------------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| Diâmetro externo | encontrado | 0,51 | 0,38 | 0,38 |
| | típico <i>MIM</i> | 0,30 | 0,30 | 0,30 |
| | diferença | 0,21 | 0,08 | 0,08 |
| Diâmetro intermediário | encontrado | 0,43 | 0,23 | 0,32 |
| | típico <i>MIM</i> | 0,30 | 0,30 | 0,30 |
| | diferença | 0,13 | -0,07 | 0,02 |
| Diâmetro interno | encontrado | 0,51 | 0,41 | 0,46 |
| | típico <i>MIM</i> | 0,30 | 0,30 | 0,30 |
| | diferença | 0,21 | 0,11 | 0,16 |

A dispersão dos valores dimensionais encontrados nos ciclos de processamento, para a cota diâmetro interno, é apresentada na figura 53.

O comportamento da dispersão dimensional para as três cotas foi similar, para os ciclos de processamento, porém os valores absolutos não, devido ao diferente gradiente de temperatura encontrado entre os mesmos.

Os valores absolutos, para o ciclo 1, são maiores se comparados aos encontrados nos ciclos 2 e 3. Este comportamento deve-se a temperatura de patamar de sinterização alcançada para o ciclo 1, a qual foi menor em 10°C, se comparado aos ciclos 2 e 3. Este comportamento deve-se à programação do equipamento. Para o ciclo 1, a faixa admissível de temperatura para o *set point* foi $\pm 10^\circ\text{C}$. Após esta verificação de variação na temperatura de sinterização, a faixa garantida foi reduzida para $\pm 5^\circ\text{C}$, o que confirmou um melhor comportamento, devido a uma temperatura maior e mais próxima a de *set point*.

Quanto a comparação dos resultados obtidos no reator PADS e no processo atual da empresa Steelinject para esta liga, não é possível fazer tal comparação, pois a liga Fe₂Ni_{0,6}c não é obtida por outra rota de processamento, em virtude das características intrínsecas de manutenção do teor de carbono do ferro carbolina no reator PADS e

eliminação total do mesmo nas outras rotas de processamento disponíveis na empresa Steelinject..

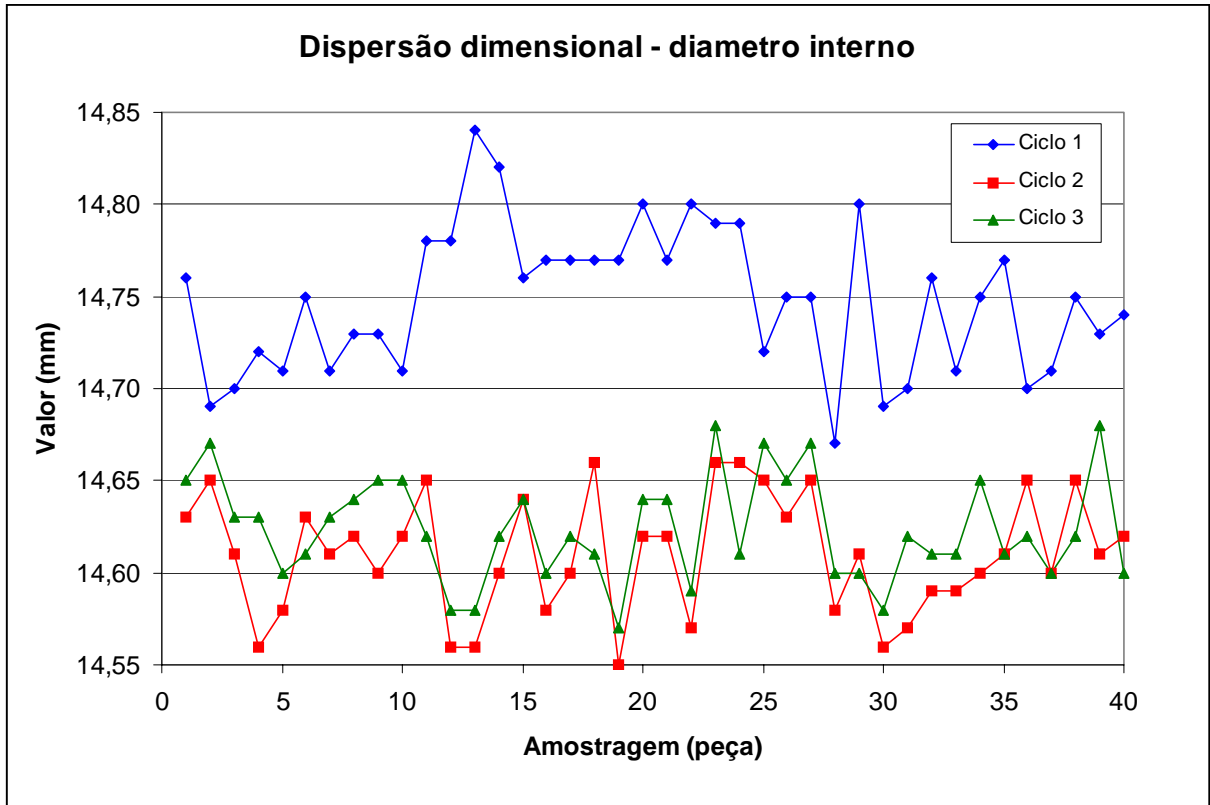


Figura 53. Gráfico da dispersão dimensional avaliada para os ciclos de processamento para a liga Fe₂Ni_{0,6}C (40 peças por lote).

O comportamento de temperatura de patamar de sinterização para os ciclos nas diferentes zonas de aquecimento é apresentado na tabela 15.

Tabela 15. Gradiente de temperatura observado para os ciclos de processamento para a liga Fe₂Ni_{0,6}C.

| | | Temperatura (°C) | | |
|-------|-----------|---------------------|---------|----------|
| ciclo | Set point | Zona de aquecimento | | |
| | | Superior | Central | Inferior |
| 1 | 1250 | 1247 | 1242 | 1240 |
| 2 | 1250 | 1253 | 1250 | 1246 |
| 3 | 1250 | 1254 | 1250 | 1247 |

Uma fotografia ilustrando as peças após o processamento via reator PADS é apresentada na figura 54.

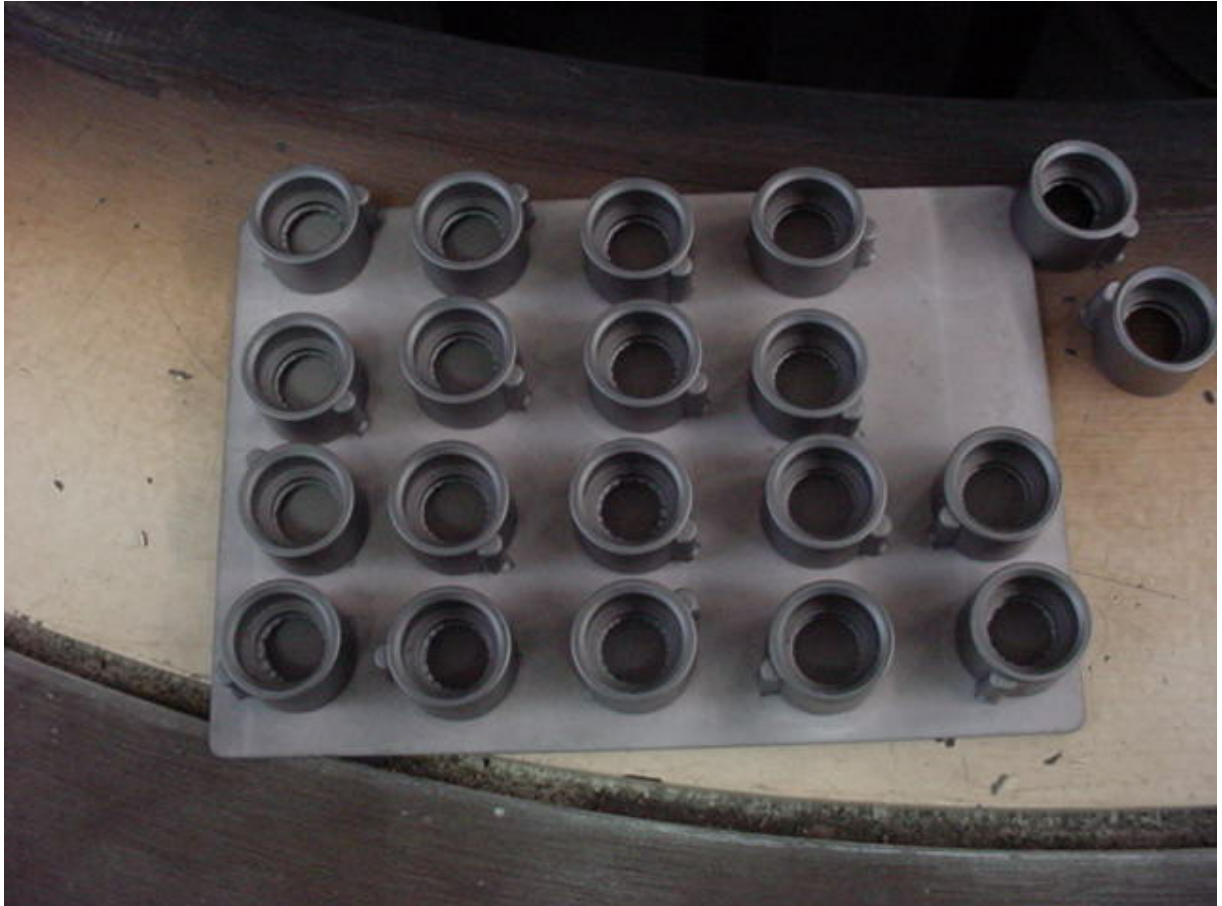


Figura 54. Fotografia das peças em $Fe_2Ni_{0,6}C$ após o processamento via reator PADS.

10.2 Testes com aços inoxidáveis

Os resultados dos ciclos de homologação para o aço inoxidável avaliado estão apresentados sob três aspectos, analogamente à forma apresentada para o aço ao carbono:

1. Condições de processamento e avaliação dos ciclos, bem como avaliação da integridade do equipamento após os ciclos produtivos;
2. Caracterização físico-mecânica das peças;
3. Comportamento dimensional dos lotes de peças;

O ciclo de processamento dos aços inoxidáveis foi projetado a partir das informações obtidas do reator piloto, resultados de extração de ligantes obtidos com o processamento da liga Fe₂Ni_{0,6}C e parâmetros de sinterização intrínsecos da liga AISI 316-L.

Esta liga é caracterizada pela alta resistência a corrosão, devido ao alto teor de cromo e níquel, bem como o baixo teor de carbono (menor que 0,03% em massa). Logo, se faz necessário durante o processamento, a eliminação por completo de todo o polímero presente no componente injetado, de forma ao material processado via PADS apresentar uma alta resistência a corrosão.

O perfil do gráfico com os parâmetros de controle de processo é apresentado a seguir, na figura 55. A taxa de aquecimento utilizada na etapa de extração de ligantes foi 1°C/min. A partir do fim da extração de ligantes, uma taxa de aquecimento de 10°C/min foi empregada até a temperatura de patamar de sinterização. Após, o resfriamento foi realizado de forma natural até 400°C, quando então o resfriamento com ventilação forçada teve início (evitar oxidação superficial da peça).

Os parâmetros de processo empregados no ciclo de processamento do aço inoxidável estão apresentados na tabela 16.

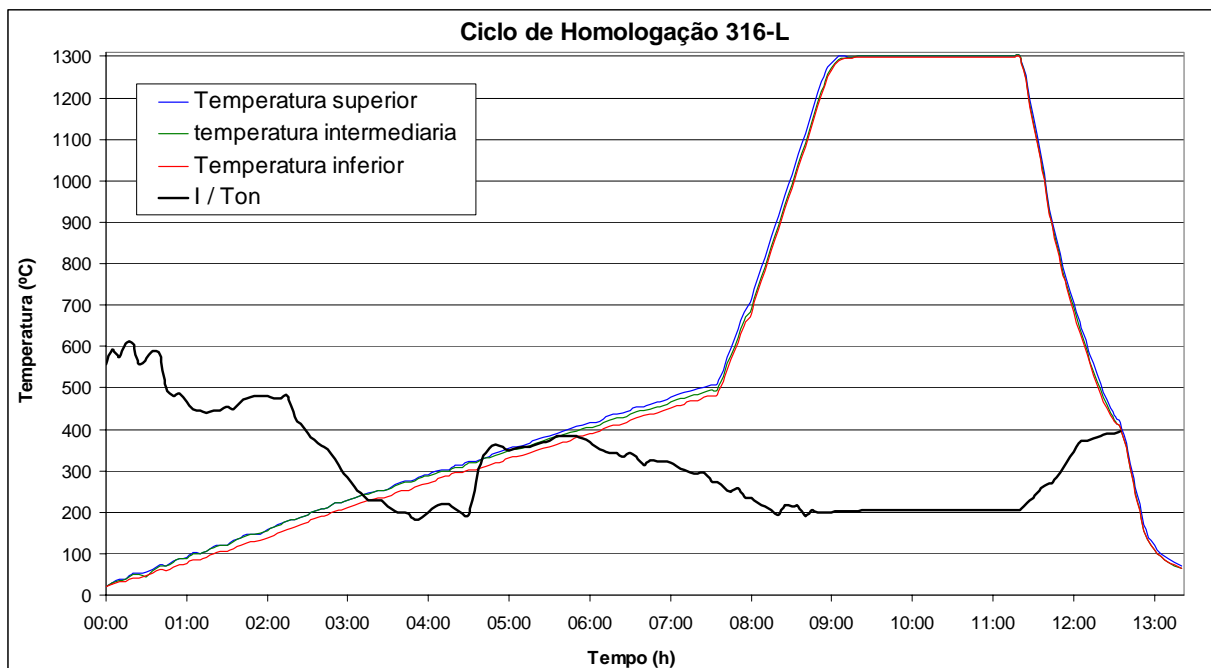


Figura 55. Perfil do gráfico de processamento da liga AISI 316-L via PADS

Tabela 16. Parâmetros de processamento para a liga AISI 316-L via PADS

| Passo | Temperatura (°C) | Tempo (h) | Pressão (Torr) | Corrente de plasma (A) | Hidrogênio (sccm) | Argônio (sccm) |
|-------|------------------------|-----------|----------------|------------------------|-------------------|----------------|
| 1 | T _{amb} - 240 | 03:15 | 1 | 4 | 20000 | 0 |
| 2 | 240 - 500 | 04:20 | 1 | 2,8 | 20000 | 0 |
| 3 | 500 - 700 | 00:35 | 1 | 2,8 | 20000 | 0 |
| 4 | 700 - 1300 | 01:00 | 1 | 2,8 | 20000 | 0 |
| 5 | 1300 | 02:00 | 1 | 2,8 | 20000 | 0 |
| 6 | 1300 - 400 | 01:20 | 1 | 2,8 | 20000 | 0 |
| 7 | 400 - 65 | 00:50 | 760 | 0 | 0 | - |

O perfil de processamento, perante o comportamento do plasma, é análogo ao ciclo de processamento da liga ao carbono.

No ciclo de processamento para o aço inoxidável a descarga de plasma é mantida durante toda a sinterização e resfriamento até 400 °C. A justificativa é a manutenção de uma atmosfera redutora, com a presença de hidrogênio atômico (H⁺), mais reativo que o hidrogênio molecular (H₂). Essa atmosfera mais limpa é fundamental para a não oxidação do material em altas temperaturas, e a mesma é possível via manutenção da descarga de plasma.

O faixa de temperatura de extração de polímero para o aço inoxidável foi idêntica à obtida para o aço ao carbono.

Uma série de fotos apresentadas a seguir (figuras 56 a 61) ilustra o comportamento da descarga de plasma antes, durante e após a extração de ligantes, evidenciando a utilização dos elétrons secundários na quebra das cadeias de polímeros, através da intensidade de luminescência da descarga de plasma.

Uma maior luminescência indica uma descarga isenta de gás rico em carbono. Uma menor luminescência indica uma descarga rica em gás com carbono, o que verifica-se a partir das temperaturas avaliadas.

A figura com menor luminescência é aquela onde a temperatura é igual a 290 °C (figura 57). Esta temperatura é a temperatura de “pico de extração”, ou seja, aquela na qual a saída de polímero por unidade de tempo é mais elevada, e a razão I/T_{on} é a menor observada.

A caracterização físico-mecânica também foi realizada de forma amostral, para as características densidade, teor de carbono e microdureza.

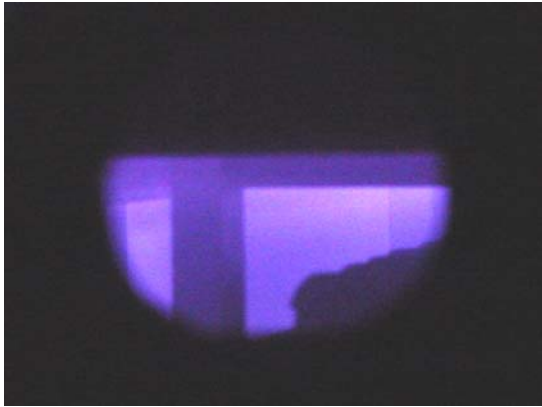


Figura 56. Descarga de plasma na temperatura de 125 °C

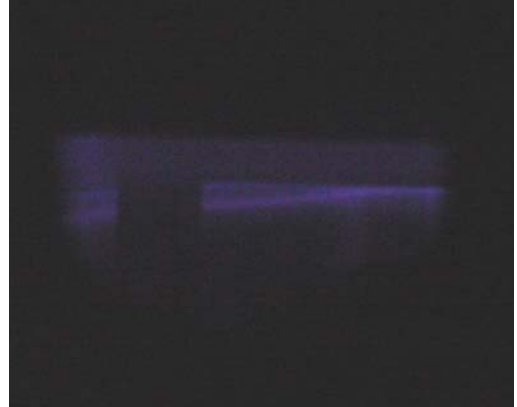


Figura 57. Descarga de plasma na temperatura de 290 °C

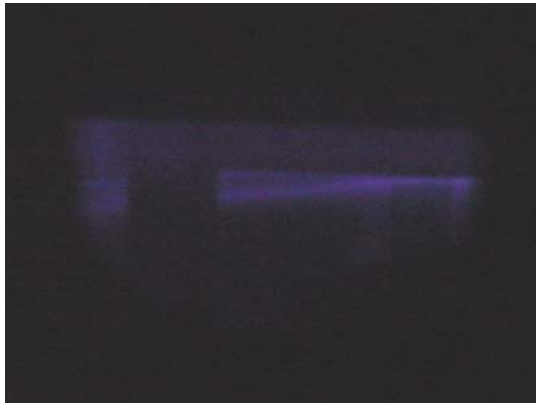


Figura 58. Descarga de plasma na temperatura de 335 °C

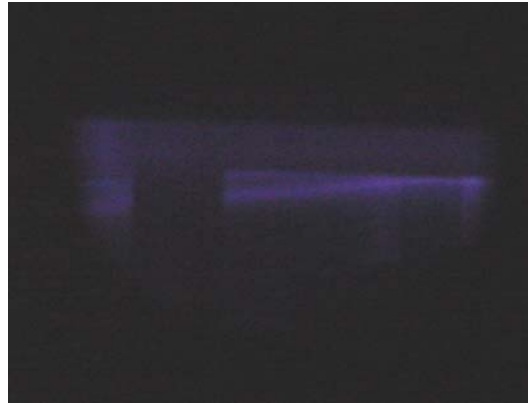


Figura 59. Descarga de plasma na temperatura de 380 °C

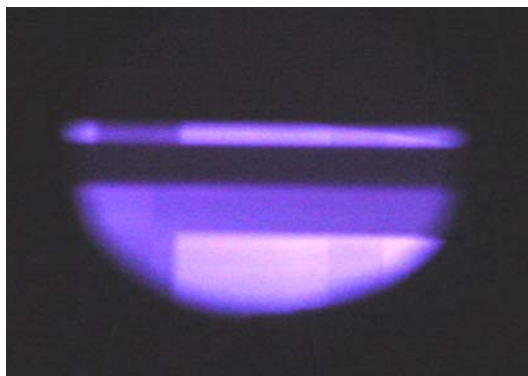


Figura 60. Descarga de plasma na temperatura de 395 °C

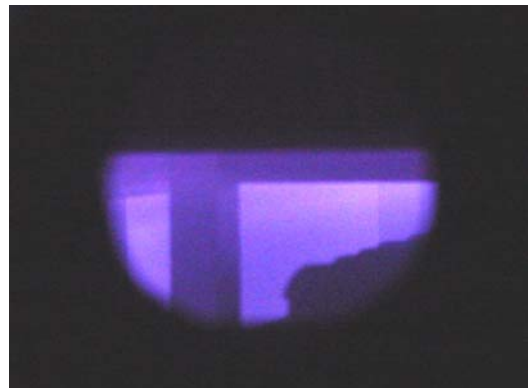


Figura 61. Descarga de plasma na temperatura de 610 °C

Após a finalização dos três ciclos de homologação para o aço inoxidável, não foi verificada a presença de fuligem sobre as peças e/ou placas cerâmicas, fusão superficial parcial nas peças sinterizadas, bem como não foi observada borra polimérica nas partes

frias do reator. Esta observação constatou a limpeza no ambiente de processamento. Nenhum defeito ou problema foi verificado após os ciclos de processamento.

Para cada ciclo de processamento foram avaliadas, para cada característica, 48 peças, sendo 2 amostras para cada bandeja (uma central e outra periférica sobre a placa), em um total de 24 bandejas (840 peças processadas por ciclo).

Os valores de densidade mensurados para os três ciclos de processamento são apresentados na tabela 17.

Tabela 17. Avaliação de densidade (método de Arquimedes) para os ciclos de processamento para a liga AISI 316-L (48 peças por lote).

| Densidade (g/cm ³) | | | | |
|--------------------------------|--------------|--------------|-------------|---------------|
| Ciclo | Valor mínimo | Valor máximo | Valor médio | Desvio padrão |
| 1 | 7,649 | 7,695 | 7,673 | 0,012 |
| 2 | 7,643 | 7,693 | 7,677 | 0,008 |
| 3 | 7,641 | 7,691 | 7,669 | 0,009 |

Densidade encontrada em rota tradicional: $7,61 \pm 0,03$ g/cm³

O comportamento de densidade foi homogêneo, devido ao baixo gradiente de temperatura encontrado no forno PADS. A densidade média de 7,67 g/cm³ reflete uma densificação de 95,9 % se comparado à densidade cristalográfica da liga (8,00 g/cm³). Todos os valores permaneceram acima de 95% de densidade relativa, o que valida o processo em relação à característica densidade [27].

O teor de carbono presente nas peças após o processamento é apresentado na tabela 18.

A homogeneidade do teor de carbono foi similar para os ciclos de homologação e o teor de carbono residual permaneceu abaixo do limite definido por norm [27] (0,03% em massa máximo). Este comportamento, aliado a uma densificação superior a 95% indica uma alta resistência a corrosão do material, uma vez que o mesmo não apresenta outras impurezas na forma de elementos químicos como silício, fósforo ou enxofre.

Uma microestrutura do aço AISI 316-L processado no PADS é ilustrada na figura 62.

Tabela 18. Teor de carbono para os ciclos de processamento para a liga AISI 316-L (48 peças por lote).

| Teor de carbono (% massa) | | | | |
|---------------------------|--------------|--------------|-------------|---------------|
| Ciclo | Valor mínimo | Valor máximo | Valor médio | Desvio padrão |
| 1 | 0,0020 | 0,0062 | 0,0041 | 0,0018 |
| 2 | 0,0009 | 0,0051 | 0,0025 | 0,0009 |
| 3 | 0,0015 | 0,0055 | 0,0031 | 0,0009 |

Teor de carbono encontrado em rota tradicional: $0,005 \pm 0,002$ % em massa.

O resultado de microdureza (Vickers 0,2 kg) é apresentado na tabela 19.

O comportamento de microdureza foi homogêneo, uma vez que o pó utilizado é pré-ligado e o teor de carbono residual é extremamente baixo.

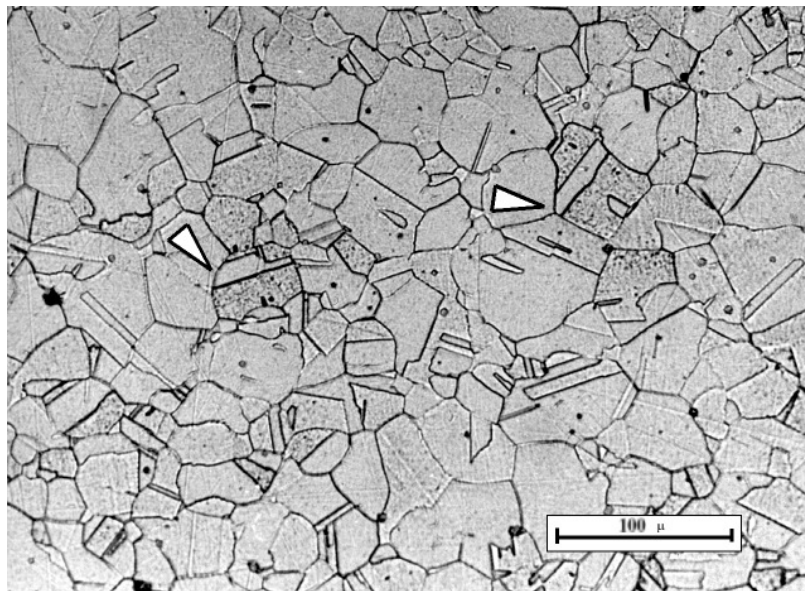


Figura 62. Microestrutura do aço inoxidável AISI 316-L processado pelo PADS.

Tabela 19. Microdureza Vickers para os ciclos de processamento para a liga AISI 316-L (48 peças por lote).

| Microdureza (HV 0,2 kg) – 3 medições por peça | | | | |
|---|--------------|--------------|-------------|---------------|
| Ciclo | Valor mínimo | Valor máximo | Valor médio | Desvio padrão |
| 1 | 164 | 172 | 169 | 2 |
| 2 | 162 | 175 | 171 | 3 |
| 3 | 161 | 173 | 167 | 4 |

Microdureza encontrada em rota tradicional: 165 ± 10 HV 0,2kg.

Na foto 63 é possível identificar um lote de peças em aço inoxidável no reator PADS após o seu processamento.

O comportamento dimensional dos ciclos em aço inoxidável foi avaliado quanto a variação e dispersão de processo encontradas para as dimensões mensuradas.

As cotas avaliadas para a peça analisada foram: diâmetro externo, diâmetro interno e altura. Uma foto da peça processada é apresentada na figura 64.

O processo consistiu na medição de 40 peças (por ciclo de processamento). O resultado dimensional dos ciclos de processamento é apresentado na tabela 20.



Figura 63. Peças processadas em aço inoxidável no reator PADS.

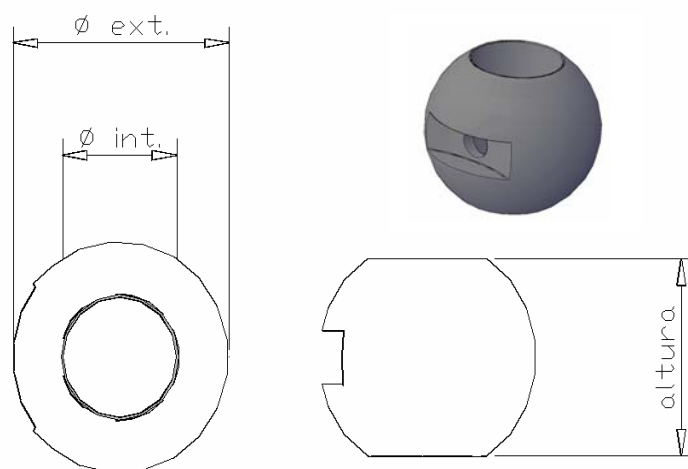


Figura 64. Foto do componente processado na liga AISI 316-L e cotas.

Tabela 20. Comportamento dimensional para os ciclos de processamento para a liga AISI 316-L
(40 peças por lote).

| Valores em mm | | ciclo | ciclo | ciclo |
|------------------|---------------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| Diâmetro externo | mínimo | 17,86 | 17,84 | 17,85 |
| | máximo | 17,98 | 17,97 | 17,94 |
| | média | 17,94 | 17,94 | 17,90 |
| | desvio padrão | 0,025 | 0,016 | 0,024 |
| Diâmetro interno | mínimo | 14,19 | 14,19 | 14,19 |
| | máximo | 14,32 | 14,32 | 14,34 |
| | média | 14,28 | 14,28 | 14,27 |
| | desvio padrão | 0,025 | 0,024 | 0,027 |
| Altura | mínimo | 9,50 | 9,50 | 9,52 |
| | máximo | 9,62 | 9,58 | 9,55 |
| | média | 9,54 | 9,54 | 9,53 |
| | desvio padrão | 0,025 | 0,020 | 0,013 |

A partir dos valores apresentados na tabela 20 é possível observar um baixo desvio padrão para as dimensões avaliadas, bem como uma baixa dispersão entre os valores para cada cota avaliada em cada ciclo de processamento. Também, uma estabilidade dimensional desejável encontrada entre os ciclos de processamento.

Quanto a variação percentual observada, a tabela 21 traz os valores percentuais e uma comparação com o valor típico de variação dimensional para o processo *MIM* ($\pm 0,3\%$).

A variação percentual encontrada está igual ou um pouco acima àquela definida como típica para o processo. Como a peça avaliada é cilíndrica, e o ponto de injeção é radial, a mesma apresenta uma maior propensão a ovalização, o que se identifica para as cotas circulares. Para a altura, onde a geometria apresenta pouca influência sobre a variação dimensional, a variação apresentada é baixa, o que valida o processamento.

O comportamento do ciclo 2 é o pior em relação a variação dimensional percentual.

Tabela 21. Variação percentual das dimensões avaliadas para os ciclos de processamento para a liga AISI 316-L (40 peças por lote).

| Valores % (\pm) | | ciclo | ciclo | ciclo |
|------------------------|-------------------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| Diâmetro externo | encontrado | 0,33 | 0,36 | 0,25 |
| | típico <i>MIM</i> | 0,30 | 0,30 | 0,30 |
| | diferença | 0,03 | 0,06 | -0,05 |
| Diâmetro intermediário | encontrado | 0,46 | 0,46 | 0,53 |
| | típico <i>MIM</i> | 0,30 | 0,30 | 0,30 |
| | diferença | 0,16 | 0,16 | 0,23 |
| Diâmetro interno | encontrado | 0,63 | 0,42 | 0,16 |
| | típico <i>MIM</i> | 0,30 | 0,30 | 0,30 |
| | diferença | 0,33 | 0,12 | -0,14 |

A dispersão dos valores dimensionais encontrados nos ciclos de processamento, para a cota diâmetro interno, é apresentada na figura 65.

O comportamento da dispersão dimensional para as três cotas foi similar, para os ciclos de processamento.

Os valores absolutos para os três ciclos de processamento apresentaram-se próximos, uma vez que os parâmetros *PID* do equipamento estavam adequados para o ciclo de processamento da liga, parâmetros estes definidos previamente na homologação dos aços ao carbono.

Quando comparados os valores dimensionais encontrados entre os processos PADS e tradicional realizado na empresa Steelinject, observa-se uma similaridade entre ambos.

Para as cotas diâmetros externo e interno a variação dimensional é ligeiramente menor para o processo tradicional Steelinject ($\pm 0,055$ contra $\pm 0,070$ mm do processo PADS). Para a cota altura, o processo PADS é mais estável ($\pm 0,06$ contra $\pm 0,07$ mm do processo atual Steelinject).

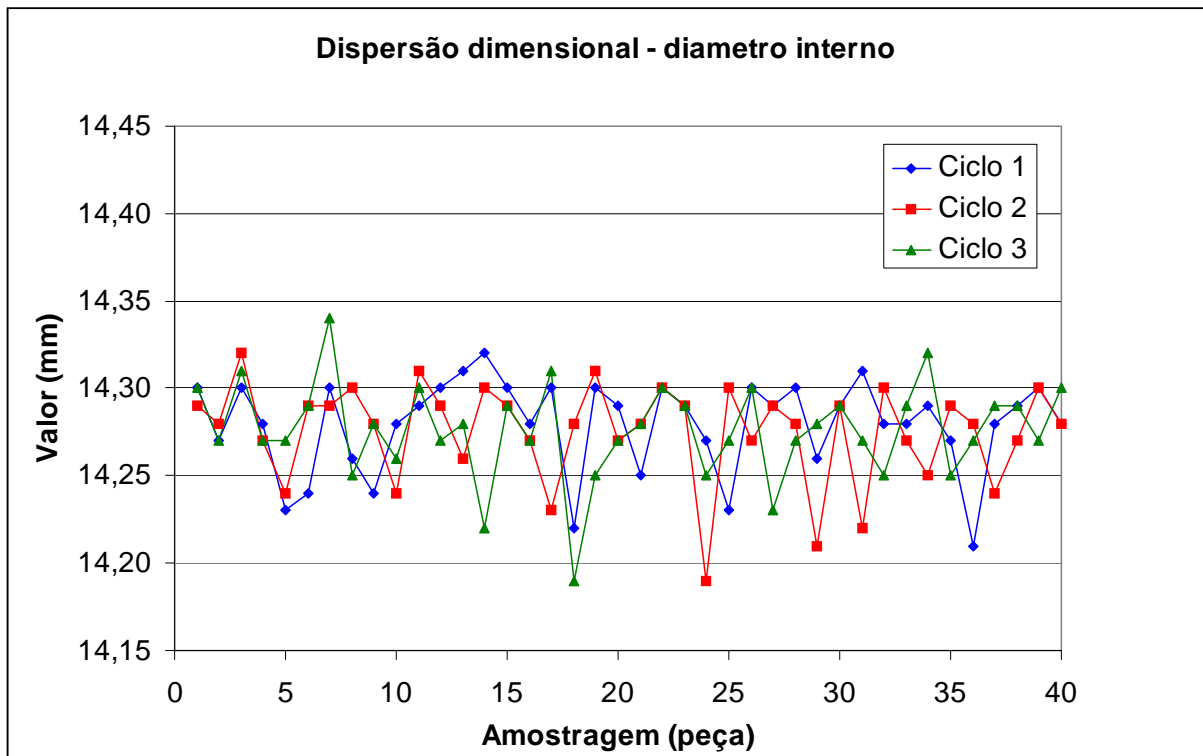


Figura 65. Gráfico da dispersão dimensional avaliada para os ciclos de processamento para a liga AISI 316-L (40 peças por lote).

O comportamento de temperatura de patamar de sinterização para os ciclos nas diferentes zonas de aquecimento é apresentado na tabela 22.

Tabela 22. Gradiente de temperatura encontrado para os ciclos de processamento para a liga AISI 316-L

| Temperatura (°C) | | | | |
|------------------|-----------|---------------------|---------|----------|
| ciclo | Set point | Zona de aquecimento | | |
| | | Superior | Central | Inferior |
| 1 | 1300 | 1301 | 1302 | 1299 |
| 2 | 1300 | 1302 | 1303 | 1298 |
| 3 | 1300 | 1301 | 1302 | 1297 |

Uma fotografia ilustrando as peças após o processamento via reator PADS é apresentada na figura 66.



Figura 66. Fotografia das peças em aço inoxidável após o processamento via reator PADS.

11. Discussão geral e síntese dos resultados

O reator de plasma (PADS) utilizado para o processamento de componentes obtidos através da tecnologia *MIM* é um equipamento novo, de tecnologia recente e avançada. Nesta direção, a metodologia de projeto aplicada ao trabalho auxiliou fortemente na obtenção do mesmo, de forma que uma abordagem multidisciplinar e sistêmica foi utilizada.

A obtenção prévia de um reator em escala piloto (LabMat – UFSC) auxiliou de grande forma a obtenção do equipamento em escala industrial, uma vez que o *try-out* do funcionamento dos sub-sistemas, o princípio de operação e testes preliminares foram realizados previamente.

As diferenças existentes entre as necessidades de um laboratório de pesquisa e da indústria são marcantes, logo uma série de alterações foi realizada e o enfoque de projeto foi modificado, com o objetivo de possibilitar ao reator industrial uma robustez condizente com a necessidade da indústria. Também, o tamanho do equipamento industrial foi maior, em função da produtividade necessária. Assim, uma série de dimensionamentos foi efetuada sem levar em consideração o desempenho do equipamento piloto.

Os resultados do projeto e da construção foram satisfatórios, uma vez que um dos objetivos foi manter em um mesmo ambiente o sistema híbrido plasma – resistores elétricos em perfeito funcionamento, sem interações eletromagnéticas entre ambos.

O equipamento foi projetado e construído a partir de uma definição da empresa Lupatech (por sua direção), em termos de valor financeiro disponibilizado e objetivo inicial.

De acordo com os resultados de homologação, o objetivo da empresa foi cumprido no que tange a capacidade de processamento, qualidade dos componentes processados e desempenho do equipamento em termos de produtividade, bem como projeção internacional para processo de patenteamento.

Referente ao desempenho técnico do equipamento, em síntese, os resultados alcançados são os seguintes:

1. O vácuo final e nível de vazamento foram adequados o suficiente para processar aços inoxidáveis e aços ao carbono.
2. O gradiente de temperatura observado ao longo de todo o perfil de processamento entre as fases de aquecimento esteve de acordo com o projetado, resultando em uma estabilidade dimensional adequada para os produtos sinterizados, decorrente do aquecimento independente por zona e utilização de um sistema PID para o controle de temperatura;
3. A descarga de plasma apresentou-se de forma estável, com a ocorrência de poucos arcos, de forma que não foi observada fuligem ou borra polimérica no reator após os ciclos de processamento;
4. O controle de processo foi efetuado de forma automática, sem a intervenção humana após início de processo, o que indica o grau de confiabilidade do sistema eletrônico e de controle do reator;
5. Foi possível realizar no mesmo equipamento as etapas de extração térmica de ligantes e sinterização, sem a presença de resíduos poliméricos, de forma que a qualidade final das peças foi condizente com o desempenho da tecnologia *MIM*;
6. O equipamento mostrou-se robusto, sem a presença de defeitos críticos. Os testes iniciais observaram pequenas falhas de dimensionamento eletro-eletrônico, falhas estas corrigidas na mesma etapa, sem prejudicar o desempenho do reator PADS;
7. As patentes internacionais do processo e do equipamento foram depositadas, de forma a assegurar a tecnologia desenvolvida e possibilitar, no futuro, uma eventual comercialização da mesma, rendendo dividendos para a empresa Lupatech e reconhecimento intelectual da UFSC – LabMat;
8. A responsabilidade ambiental foi atingida, mediante os objetivos delineados, por se tratar de um equipamento de baixo consumo de

energia e gás de processo, como também baixa emissão de resíduos para a atmosfera e forma mais limpa dos mesmos;

9. A criação de uma nova rota de processamento para componentes *MIM* foi obtida na empresa Steelinject Ltda, possibilitando desta forma a obtenção de novos projetos para a mesma, aumentando o faturamento e lucratividade da empresa;
10. O desempenho físico–mecânica-dimensional dos componentes processados no reator PADS foi satisfatória, em acordo com os resultados esperados para produtos processados via tecnologia *MIM*;

Como sugestões para trabalhos futuros, observado durante a homologação do reator PADS, têm-se:

1. Projeto, fabricação e homologação de um suporte de carga de maior capacidade de processamento, para a condição atual de volume útil do equipamento;
2. Controle *on-line* do processo (via computador) para os parâmetros de processo, através de rede de comunicação equipamento – unidade de trabalho;
3. Desenvolvimento de novas ligas metálicas no reator PADS, como aços para aplicação magnética, titânio, super-ligas e outros;
4. Colocação de coletor de resíduos sólidos (*trap*), de forma preventiva, para evitar eventuais problemas de deposição de partículas sólidas e/ou condensadas nas bombas de vácuo e partes frias da tubulação;
5. Estudo mais otimizado dos parâmetros de plasma durante as etapas de extração de ligantes e sinterização, de forma a reduzir o tempo de processamento dos materiais, objetivando redução de custo;
6. Utilização de espectroscopia de massa para verificação das espécies químicas formadas, provenientes da decomposição das cadeias poliméricas dos ligantes pela ação da descarga de plasma.

Referências Bibliográficas

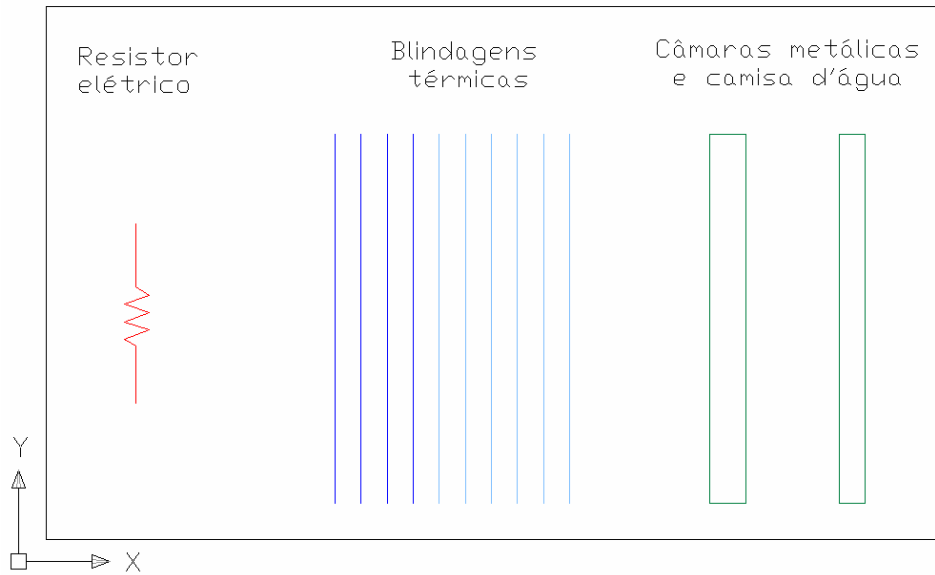
- [1] BATISTA, V. J., MAFRA, M., MUZART, J. L. R., KLEIN, A. N., BACK, N., *Plasma sintering: A novel process for sintering metallic components*, Materials Science Forum, Ed. Trans. Tech. Publications, 299-3, 249-253, 1999.
- [2] WENDHAUSEN, P. A.P., MUZART, J. L. R., FREDEL, M. C., de SOUZA, A.R., KLEIN, A. N., MENDES, L. A., *Debinding of MIM Parts in a Plasma Reactor*, 20th Heat Treating Society Conference, St. Louis, USA, 2000.
- [3] MENDES, L. A., *Desenvolvimento e Validação de um Reator Piloto para processamento de materiais por plasma*, Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- [4] GERMAN, R. M., BOSE, A., *Injection Molding of Metals and Ceramics*, Metal Powder Industries Federation, New Jersey, 1997.
- [5] GERMAN, R. M., *Powder Injection Molding, Design & Application, User's Guide*. Innovative Material Solutions, Inc. State College, PA, USA, 2003.
- [6] GERMAN, R. M., *Theory of Thermal Debinding*, The International Journal of Powder Metallurgy, V 23, N° 4, 1687.
- [7] THÜMMLER, F., OBERACKER, R., *An Introduction to Powder Metallurgy*, The Institute of Materials. Series on Powder Metallurgy. Editors: Jenkins and J. V. Wood, 1993.
- [8] MACHADO, R., *Moldagem de Pós por Injeção*, Estudo Dirigido, Curso de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- [9] CHAPMAN, B. N., *Glow Discharge Processes*, New York, John Wiley & Sons, 1980.
- [10] VON ENGEL, A., *Ionized Gases*, Oxford Press, 2^a edition, 1965.
- [11] ESCOBAR, J. A., *Extração de ligantes e sinterização por plasma de metal duro*. Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- [12] MACHADO, R., RISTOW, W. Jr., ALBA, P. R., KLEIN, A. N., WENDHAUSEN, P. A. P., FUSÃO, D. *Plasma Assisted Debinding and Sintering (PADS) – Metal Injection Molding Application*, PTECH 2005, Brazil.

- [13] MACHADO, R., RISTOW, W. Jr., ALBA, P. R., KLEIN, A. N., WENDHAUSEN, P., *Performance of PADS process for MIM 316-L processing*, SBPMAT 2006, Brazil.
- [14] MALISKA, A. M., *Influência de elementos de liga e do oxigênio no processo de nitretação por plasma de aços sinterizados*, Tese de Doutorado, Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.
- [15] PAHL, G. & BEITZ, W., *Engineering Design: a Systematic Approach*, Springer-Verlag, Berlin, 1988.
- [16] BACK, N., FORCELLINI, F. A., *Projeto Conceitual*, Apostila Didática, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, 1996.
- [17] HAUSER, J.R. & CLAUSING, D., *The House of Quality*, Harvard Business Review, May-June, pp.63-73, 1988.
- [18] BACK, N., *Metodologia de Projeto de Produtos Industriais*, Guanabara Dois, 1983.
- [19] STANDARD TEST METHODS FOR METAL POWDERS AND POWDER METALLURGY PRODUCTS, Metal Powder Industries Federation, Edition 1999.
- [20] TIMOSHENKO & GERE, *Theory of Elastic Stability*, 2^a ed, McGraw Hill Book Company Inc., 1961.
- [21] ASME, section VIII, div. 2, article D-3, Shells of Revolution under External Pressure.
- [22] CHIAVERINI, V., *Aços e Ferros Fundidos*, ABM 7^a Ed., 1996.
- [23] INCROPERA, P. F., de WITT, D. P., *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, 4^a ed., LTC, Rio de Janeiro, 1998.
- [24] PLANSEE, *Molybdenum. Material properties and applications catalog*.
- [25] BOC EDWARDS, *Product Catalog*, 2003/04.
- [26] FOX, R. W., McDONALD, A. T., *Introdução à Mecânica dos Fluidos*, 4^a ed., LTC, Rio de Janeiro, 1998.
- [27] MPIF STANDARD 35, Materials Standard for Metal Injection Molded Parts, Metal Powder Industries Federation, New Jersey, 2007 Edition.

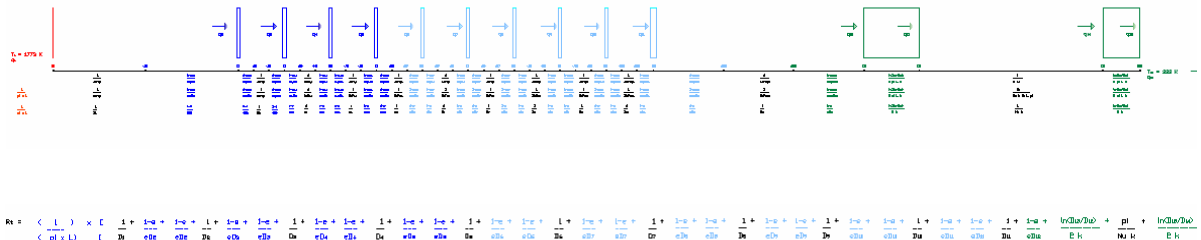
Anexo 1

Cálculo da transferência de calor para a mufla térmica do reator PADS

Volume de controle



Equação de transferência de calor (resistência térmica): radiação entre a resistência e as blindagens, condução entre as paredes das câmaras e convecção na camisa d'água entre as câmaras metálicas.



- Dados iniciais:

Temperatura 1: 1773 K (resistor elétrico: 1500 °C)

Temperatura 15: 333 K (lado externo da câmara externa do reator: 60 °C)

L: 0,575 m

- Dados levantados:

As emissividades (ϵ) dos materiais empregados no calculo de transferência de calor, onde:

$$e_{Mo} = 0,20$$

$$e_{aço\ inox} = 0,35$$

$$e_{aço\ carbono} = 0,60$$

O fator de forma, por ser radial, é dado pelo diâmetro de cada elemento do volume de controle, onde:

$$D_1: 0,80\text{ m}$$

$$D_2: 0,93\text{ m}$$

$$D_3: 0,94\text{ m}$$

$$D_4: 0,96\text{ m}$$

$$D_5: 0,97\text{ m}$$

$$D_6: 0,99\text{ m}$$

$$D_7: 1,00\text{ m}$$

$$D_8: 1,01\text{ m}$$

$$D_9: 1,03\text{ m}$$

$$D_{10}: 1,04\text{ m}$$

$$D_{11}: 1,06\text{ m}$$

$$D_{12}: 1,30\text{ m}$$

$$D_{13}: 1,31\text{ m}$$

$$D_{14}: 1,37\text{ m}$$

$$D_{15}: 1,39\text{ m}$$

Condutividade térmica dos materiais utilizados:

$$k_{aço\ carbono} = 50\text{ W/m.K (150 °C)}$$

$$k_{água} = 650\text{ W/m.K (60 °C)}$$

O numero de Nusselt (Nu) para a água foi obtido a partir dos parâmetros do volume de controle do sistema entre as câmaras do reator (escoamento desenvolvido em região anular entre dois tubos concêntricos).

$$\text{Nu} = h \cdot D_h / k$$

$$D_h \text{ (diâmetro hidráulico)} = D_e - D_i$$

Pela tabela 8.2 (Incropera), o Nu para escoamento entre tubos onde $D_i/D_e = 1,31 / 1,37 = 0,96$ é $\text{Nu} = 4,80$.

Assim, pela equação:

$$q = \nabla T / R_t$$

onde:

q é o fluxo de calor, em W/m

∇T é a diferença de temperatura, em K

R_t é a resistência térmica entre os pontos de temperatura definidos, em K . m / W

Logo,

$$q_{1,15} = T_1 - T_{15} / R_t (1,15).$$

Esta é a taxa líquida de transferência de calor entre as resistências térmicas do volume de controle, e a mesma é constante ao longo das resistências térmicas. Assim, observa-se que,

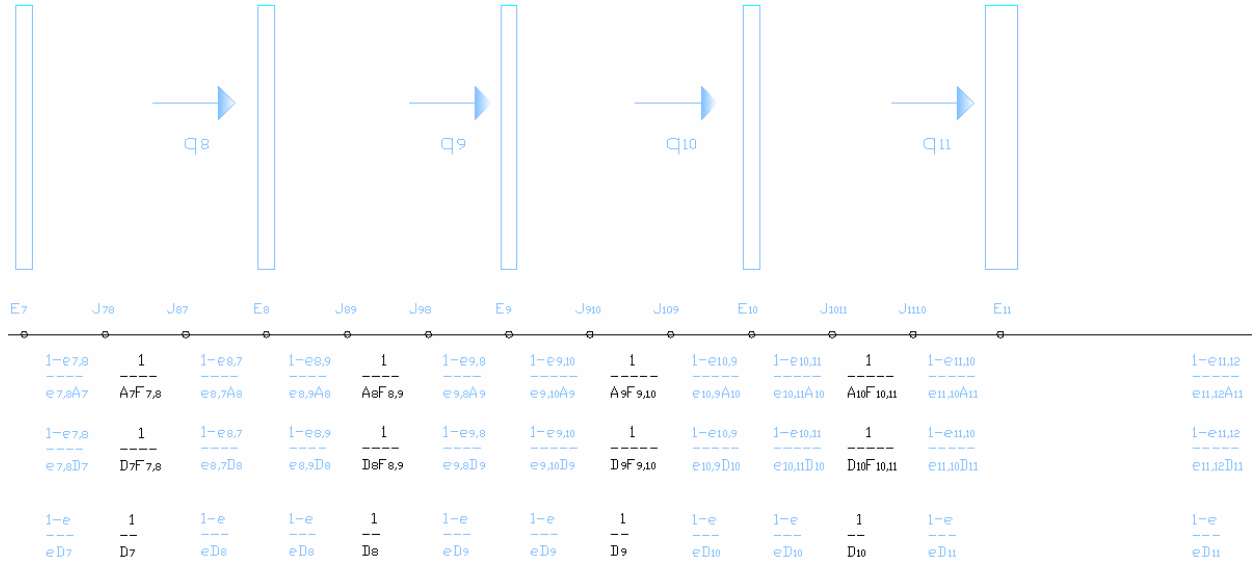
$$Q_{(1,n+1)} = T_1 - T_{n+1} / R_t (1,n+1)$$

e

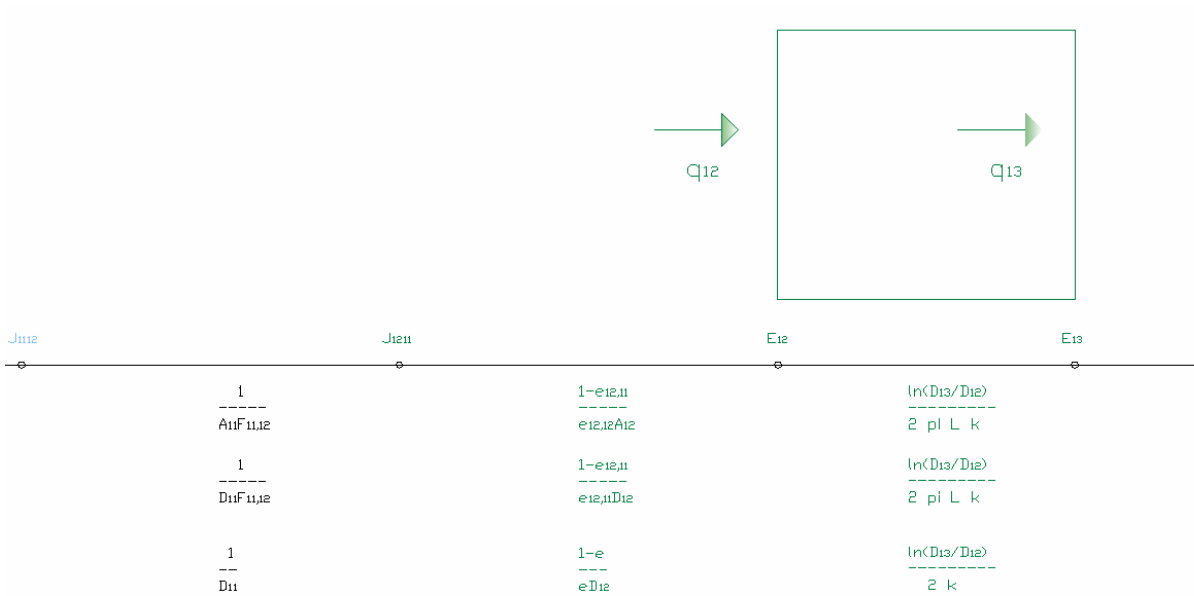
$$Q_{(n,n+1)} = Q_{(n+1,n+2)}$$

Com isso, é possível obter-se o valor das temperaturas das diferentes blindagens e paredes metálicas ao longo do volume de controle, a partir dos valores das resistências térmicas pertinentes a variação, o valor de q e uma das temperaturas entre a variação.

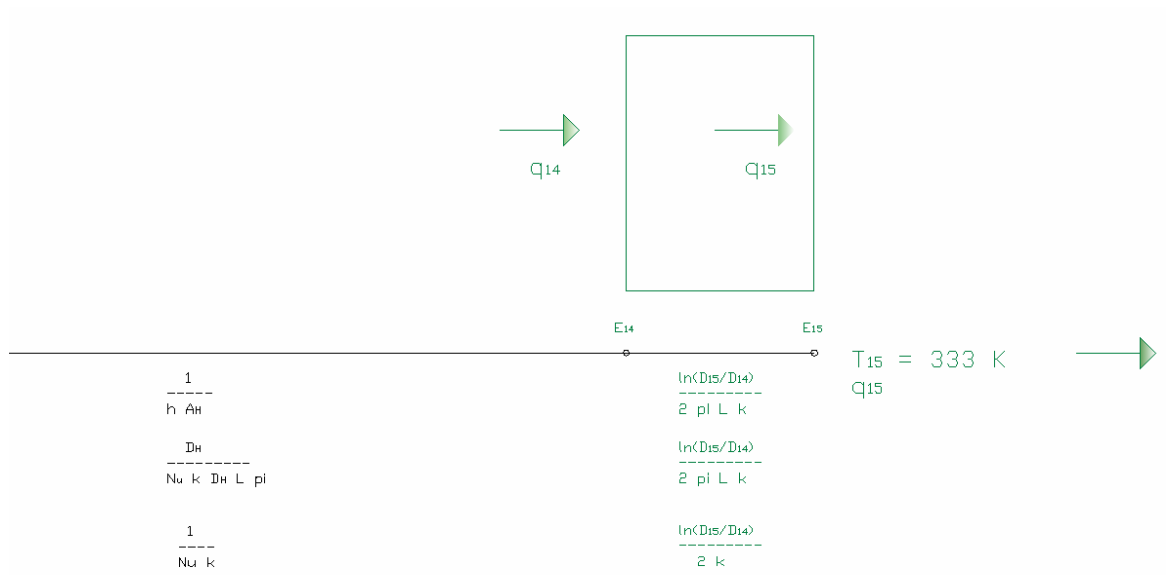
- Resistência térmica entre uma blindagem em aço inox (q_8) e a última blindagem em aço inox (q_{11}):



- Resistência térmica entre a espessura de parede da câmara hermética do reator (q_{12} e q_{13}):



- Resistência térmica entre a camisa d'água (q₁₄) e o ar ambiente (q₁₅):



Como exemplo do cálculo a ser efetuado, tem-se que:

$$q_{(6,7)} = T_6 - T_7 / R_t (6,7)$$

$$q_{(1,15)} = (T_6 - T_7) / (1 / \pi) \times ((1 - e_{\text{aço inox}} / e_{\text{aço inox}} \times D_6) + (1/D_6) + (1 - e_{\text{aço inox}} / e_{\text{aço inox}} \times D_7))$$

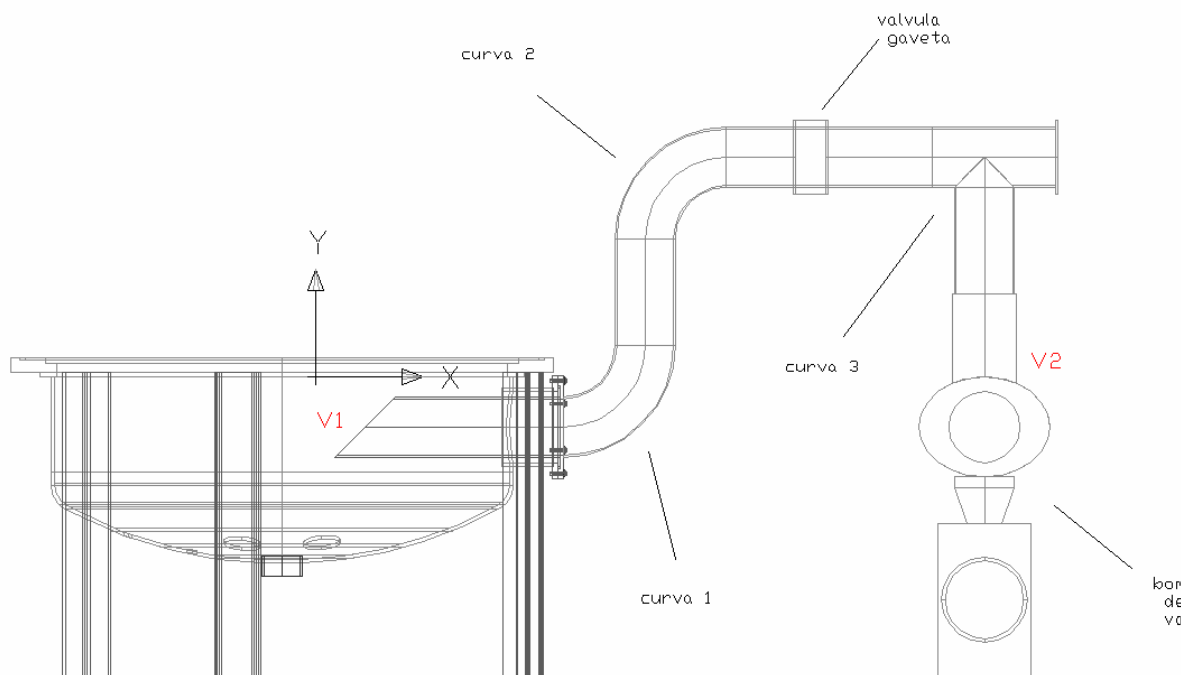
Por esse método, é possível obter todas as temperaturas teóricas da blindagem térmica do reator PADS.

Anexo 2

Cálculo da perda de carga devido à tubulação existente entre o reator PADS e as bombas de vácuo

A partir da velocidade de bombeamento informada pelo fabricante, para a pressão de trabalho desejada e para o gás de processo empregado (1 Torr e ar atmosférico, respectivamente), é possível obter a velocidade real de bombeamento em função das perdas de carga provenientes dos acessórios existentes entre a câmara do reator PADS e as bombas de vácuo EH 1200 + E2M80 (60 Hz).

O volume de controle é identificado abaixo, onde as velocidades V_1 e V_2 são, respectivamente, as velocidades teórica do grupo de bombas de vácuo e a real, após a perda de carga observada.



Os cálculos e resultado estão apresentados a seguir. As equações e curvas para os cálculos foram extraídas do livro Introdução à Mecânica dos Fluidos.

Equação de Bernoulli para escoamento em tubos internos

$$(p_1/\rho + \alpha_1 \cdot V_1^2/2 + gz_1) - (p_2/\rho + \alpha_2 \cdot V_2^2/2 + gz_2) = h_{IT}$$

Condições de contorno:

$$p_1 = p_2 = 1 \text{ Torr}$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 1$$

$$z_1 = z_2 = 0$$

$$V_1 = 845,06 \text{ m}^3/\text{h} = 0,234739 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (dado do fabricante BOC para grupo de bombas de vácuo existentes)}$$

$$V_2 = V \text{ nos acessórios, em m}^3/\text{s}$$

$$h_{IT} = \Sigma (h_{\text{atrito}} + h_{\text{curvas}} + h_{\text{válvula}})$$

Assim, a equação reduz-se a

$$(V_1^2/2) - (V_2^2/2) = (h_{\text{atrito}} + h_{\text{curvas}} + h_{\text{válvula}})$$

onde

$$h_{\text{atrito}} = f \cdot L/D \cdot V^2/2$$

$$h_{\text{curvas}} = f \cdot Le/D \cdot V^2/2 = h_{\text{válvula}} = f \cdot Le/D \cdot V^2/2$$

Le = comprimento equivalente

f = fator de atrito

Para tubo liso, com o diâmetro empregado de $D = 0,159 \text{ m}$, tem-se

$$e/D \text{ (rugosidade relativa)} = 0,00026$$

Assim, pela curva de fator de atrito, obtém-se

Re = 2 (número de Reynolds)

$$f = 0,016$$

Le para curva 90° = 60 m (raio relativo $r/D = 1,43$) - 3 curvas

Le para válvula gaveta = 8 m

$$L = 0,556 + 0,3 + 0,724 + 0,3 = 1,88 \text{ m (comprimento total da tubulação)}$$

$$D = 0,159 \text{ m}$$

A equação para a solução do problema é

$$(V_1^2/2) - (V_2^2/2) = (f \cdot L/D \cdot V^2/2) + (f \cdot Le_{\text{curvas}}/D \cdot V^2/2) + (f \cdot Le_{\text{válvula}}/D \cdot V^2/2)$$

Admitindo $V_2 = V$ e somando os termos de Le das curvas e válvula, chega-se a Le_T , obtendo-se a equação

$$Le_T = 20 + 20 + 8 = 48$$

$$(V_1^2/2) - (V^2/2) = (f \cdot L/D \cdot V^2/2) + (f \cdot Le_T/D \cdot V^2/2)$$

$$(0,234739^2/2) - (V^2/2) = (0,016 \cdot 1,88/0,159 \cdot V^2/2) + (0,016 \cdot 68/0,159 \cdot V^2/2)$$

$$0,0275512 - 0,5V^2 = 0,0946V^2 + 3,4214V^2$$

$$0,0275512 = 4,016V^2$$

$$V^2 = 0,00686035$$

$$V = 0,082827 \text{ (m}^3/\text{s)}$$

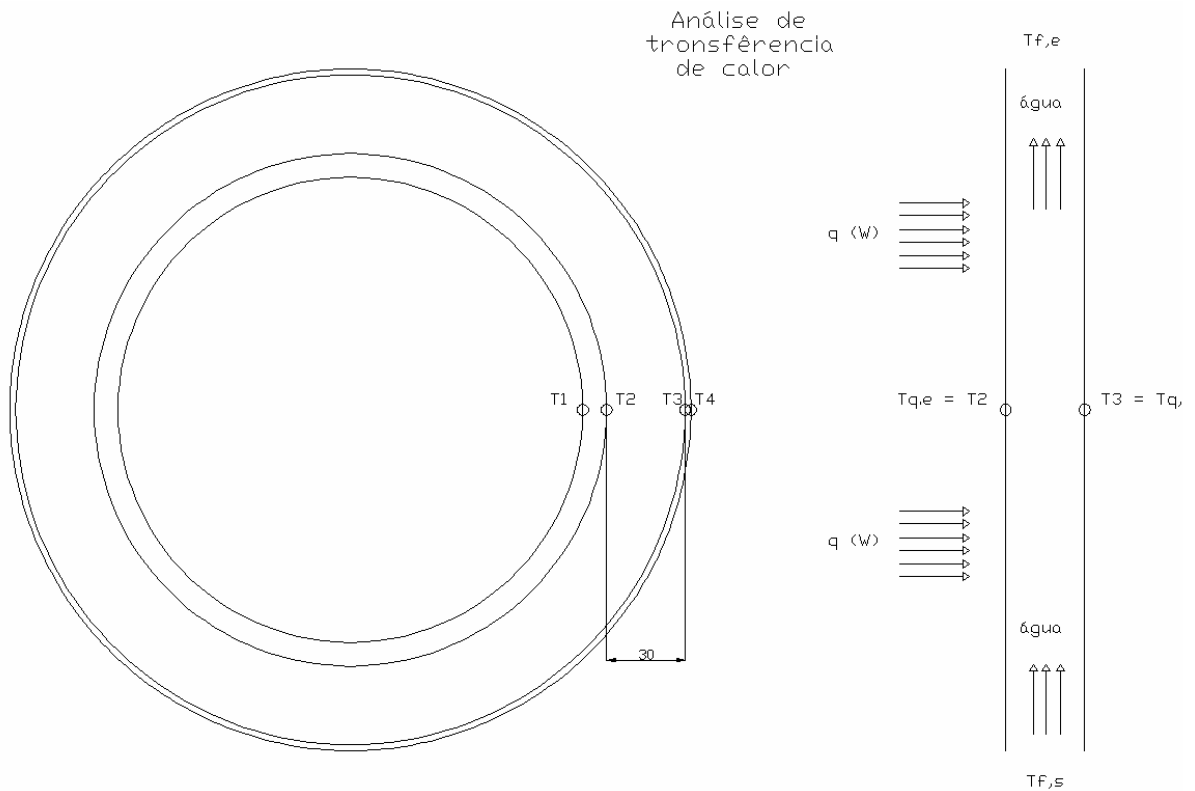
$$\mathbf{V = 298,18 \text{ m}^3/\text{h}}$$

Anexo 3

Cálculo da vazão de água necessária para a refrigeração da câmara hermética do reator PADS

A partir das temperaturas das superfícies interna e externa da câmara hermética, e da quantidade de calor radiante a partir da região interna do reator (mufla), é possível determinar a vazão de água requerida de forma a manter a temperatura externa do reator abaixo dos 60°C.

O volume de controle é identificado abaixo.



Os cálculos e resultado estão apresentados a seguir. As equações e curvas para os cálculos foram extraídas do livro Fundamentos de transferência de calor e de massa.

Equação de equilíbrio de energia entre zona quente e fria

$$q_q = q_{(T_{q,e} - T_{q,s})} = (T_{q,e} - T_{q,s}) \times L / \pi \times N_u \times k_{\text{água}}$$

Condições de contorno:

$$T_{q,e} = 167^{\circ}\text{C}$$

$$T_{q,s} = 61^{\circ}\text{C}$$

$$L = 1,785 \text{ m}$$

$$k_{\text{água}} = 650 \text{ W/mK (a } 55^{\circ}\text{C)}$$

$$N_u = 4,80 \text{ (tabela 8.2 Incropera - escoamento entre tubos)}$$

$$q_q = (167 - 61) \times 1,785 / 3,141592 \times 4,80 \times 650$$

$$q_q = 1854 \text{ kW}$$

$$q_f = m \times c_{p\text{água}} \times (T_{f,s} - T_{f,e})$$

Condições de contorno:

$$T_{f,s} = 55^{\circ}\text{C (máxima, devido eficiencia da torre de arrefecimento)}$$

$$T_{f,e} = 20^{\circ}\text{C (máxima, devido eficiencia da torre de arrefecimento)}$$

$$c_{p\text{água}} = 4178 \text{ J/kg}\cdot\text{K (} T_m = (55+20)/2 = 37,5^{\circ}\text{C)}$$

Para o sistema em equilíbrio, observa-se que $q_q = q_f$

$$\text{Então, } q_q = q_f = 1854000 \text{ W}$$

Assim,

$$q_f = m' \times c_{p\text{água}} \times (T_{f,s} - T_{f,e})$$

$$1854000 = m' \times 4178 \times (55 - 20)$$

$$m' = 1854000 / 4178 \times 35$$

$$m' = 1854000 / 146230$$

$$m' = 12,7 \text{ kg/s}$$

$$\rho = m/V$$

$$\rho_{\text{água}} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$V = m/\rho$$

$$V = 12,7/1000$$

$$V = 0,0127 \text{ m}^3$$

$$m' = 0,0127 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$m' = 12,7 \text{ Vs}$$

$$m' = 762 \text{ l/min}$$

**Dimensionamento dos trocadores de calor e seleção do ventilador
centrífugo para o resfriamento forçado do reator PADS**

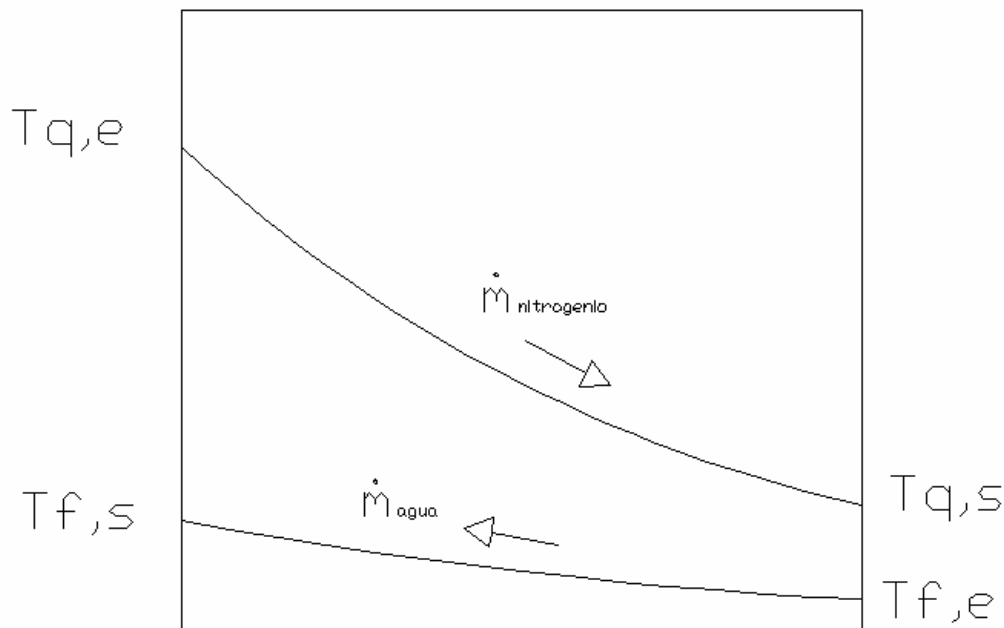
O dimensionamento dos trocadores de calor foi realizado a partir das condições de operação disponíveis na empresa Steelinject, bem como da necessidade de operação do reator PADS.

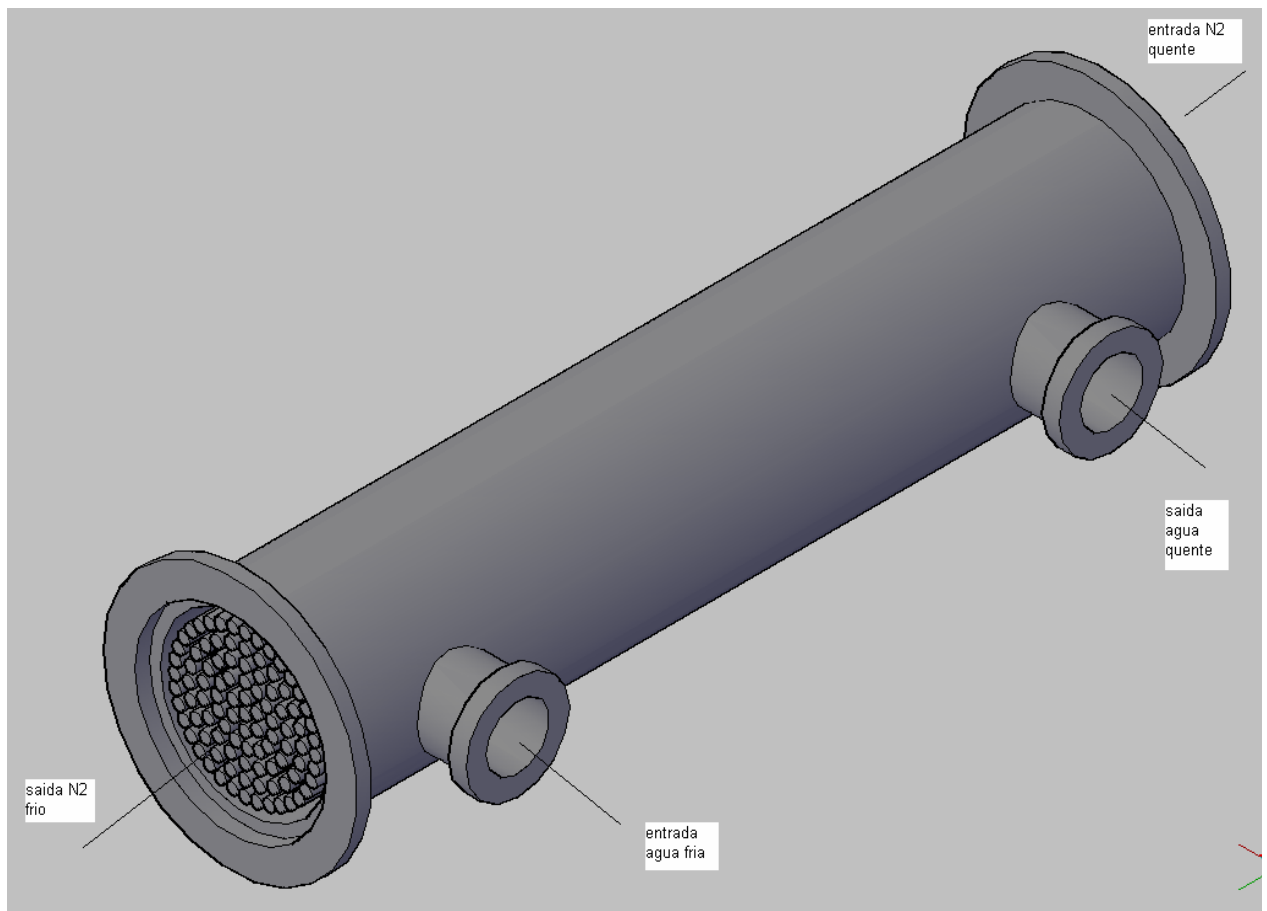
Assim, as seguintes condições iniciais foram estabelecidas para cálculo:

- Temperatura de entrada do gás quente no trocador de calor ($T_{q,e}$): 700°C;
- Temperatura de saída do gás quente no trocador de calor ($T_{q,s}$): 60°C;
- Temperatura de entrada da água no trocador de calor ($T_{f,e}$): 20°C (máximo);
- Temperatura de saída da água no trocador de calor ($T_{f,s}$): 55°C (máximo);
- Vazão de água no trocador de calor: 12,7 kg/s (definido a partir da necessidade de refrigeração da camisa d'água do reator e vazão disponível na rede de água de refrigeração da empresa Steelinject (refrigeração por torre de arrefecimento));

O tipo de trocador de calor definido foi casca e tubos (com um passe) em contracorrente, com 150 tubos em cobre. O gás de processo utilizado foi nitrogênio (N_2).

Abaixo é ilustrado o diagrama de temperaturas para o sistema, bem como o volume de controle para o mesmo.





Os cálculos e resultado estão apresentados a seguir. As equações e curvas para os cálculos foram extraídas do livro Fundamentos de transferência de calor e de massa.

Condições iniciais:

$$T_{q,p} = 700^{\circ}\text{C}$$

$$T_{q,s} = 60^{\circ}\text{C}$$

$$T_{T,p} = 20^{\circ}\text{C}$$

$$T_{T,s} = 55^{\circ}\text{C}$$

$$m'_T = 12,7 \text{ kg/s}$$

$$D_{\text{externo}} = 0,3 \text{ m}$$

$$D_{\text{interno}} = 0,02 \text{ m}$$

$$N = 150 \text{ (numero de tubos)}$$

$$D_{\text{equivalente}} = 0,1732 \text{ m (passagem do gás)}$$

Dados para os cálculos:

$$T_{m,d} = 760/2 = 380^{\circ}\text{C}$$

$$T_{m,t} = 75/2 = 37,5^{\circ}\text{C}$$

Obs.: os valores abaixo foram obtidos a partir de T_m para os dois fluidos.

$$c_{\text{nitrogenio}} = 1086,5 \text{ J/kgK}$$

$$c_{\text{agua}} = 4178 \text{ J/kgK}$$

$$\mu_{\text{nitrogenio}} = 305 \times 10^{-7} \text{ Ns/m}^2$$

$$\mu_{\text{agua}} = 695 \times 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$$

$$Pr_{\text{nitrogenio}} = 0,7035$$

$$Pr_{\text{agua}} = 4,62$$

$$k_{\text{nitrogenio}} = 47,5 \times 10^{-3} \text{ W/mK}$$

$$k_{\text{agua}} = 0,628 \text{ W/mK}$$

Calculo da transferencia de calor no sistema:

$$q_T = m'_T \times c_{\text{agua}} \times (T_{T,s} - T_{T,p})$$

$$q_T = 12,7 \times 4178 \times (55 - 20)$$

$$q_T = 1857121 \text{ W}$$

No equilibrio, $q_T = q_q$, logo

$$q_q = q_T = m'_q \times c_{\text{nitrogenio}} \times (T_{q,p} - T_{q,s})$$

$$1857121 = m'_q \times 1086,5 \times (700 - 60)$$

$$m'_q = 1857121 / 1086,5 \times 640$$

$$m'_q = 2,67 \text{ kg/s}$$

Calculo de transferencia de energia global do sistema

Agua:

$$m_1 = m' / N$$

$$m_1 = 12,7 / 150$$

$$m_1 = 0,1016 \text{ kg/s}$$

$$Re_D = 4 \times m_1 / \pi \times D_{\text{interno}} \times \mu_{\text{agua}}$$

$$Re_D = 4 \times 0,1016 / 3,141592 \times 0,02 \times 695 \times 10^{-6}$$

$$Re_D = 9306 \quad \text{o escoamento da agua é turbulento !!}$$

$$\begin{aligned} Nu &= 0,023 \times Re_D^{0,45} \times Pr_{\text{água}}^{0,4} \\ Nu &= 0,023 \times 9306^{0,45} \times 4,62^{0,4} \\ Nu &= 63,47 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{\text{água}} &= k_{\text{água}} \times Nu / D_{\text{tubo}} \\ h_{\text{água}} &= 0,628 \times 63,47 / 0,02 \\ h_{\text{água}} &= 1993 \text{ W/m}^2\text{K} \end{aligned}$$

Nitrogenio:

$$\begin{aligned} Re_D &= 4 \times m / \pi \times D_{\text{equivalente}} \times \mu_{\text{nitrogenio}} \\ Re_D &= 4 \times 2,67 / 3,141592 \times 0,1732 \times 305 \times 10^{-7} \\ Re_D &= 643537,2 \quad \text{o escoamento do nitrogênio é turbulento !!} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Nu &= 0,023 \times Re_D^{0,45} \times Pr_{\text{nitrogenio}}^{0,4} \\ Nu &= 0,023 \times 643537,2^{0,45} \times 0,7035^{0,4} \\ Nu &= 886,12 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{\text{nitrogenio}} &= k_{\text{nitrogenio}} \times Nu / D_{\text{equivalente}} \\ h_{\text{nitrogenio}} &= 0,0475 \times 886,12 / 0,1732 \\ h_{\text{nitrogenio}} &= 243,01 \text{ W/m}^2\text{K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{\text{global}} &= 1 / (1/h_{\text{água}}) + (1/h_{\text{nitrogenio}}) \\ U_{\text{global}} &= 1 / (1/1993) + (1/243,01) \\ U_{\text{global}} &= 216,6 \text{ W/m}^2\text{K} \end{aligned}$$

Fator de correção para trocador de calor com casco e mais de um tubo
Figura 11.10 Incropera

$$\begin{aligned} P &= T_{1c} - T_{1e} / T_{qf} - T_{1e} \\ P &= 55 - 20 / 700 - 20 \\ P &= 0,051 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R &= T_{qf} - T_{qs} / T_{1c} - T_{1e} \\ R &= 700 - 60 / 55 - 20 \\ R &= 18,3 \end{aligned}$$

F = 0,99 (a partir do gráfico, aproximadamente)

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{ml,c}} &= (T_{qf} - T_{1e}) - (T_{qs} - T_{1c}) / \ln [(T_{qf} - T_{1c}) / (T_{qs} - T_{1e})] \\ \Delta T_{\text{ml,c}} &= (700 - 55) - (60 - 20) / \ln [(700 - 55) / (60 - 20)] \\ \Delta T_{\text{ml,c}} &= 605 / \ln 16,125 \\ \Delta T_{\text{ml,c}} &= 217,6^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Por fim, chega-se ao comprimento do trocador de calor, definido por

$$\begin{aligned} L &= q / U_{\text{global}} \times N \times \pi \times D_{\text{tubo}} \times F \times \Delta T_{\text{ml,c}} \\ L &= 1857121 / 216,6 \times 150 \times 3,141592 \times 0,02 \times 0,99 \times 217,6 \\ L &= 4,22 \text{ m} \end{aligned}$$

A seleção para o ventilador centrífugo foi realizada a partir de um roteiro de seleção de ventiladores, disponível no livro Introdução à Mecânica dos Fluidos (seção D.3 – Apêndice D).

A partir da curva de desempenho de um ventilador centrífugo presente no livro foi estabelecido o dimensionamento do ventilador requerido, pelo método de princípio de escala.

Ao fim do dimensionamento, os dados obtidos foram:

Tamanho do ventilador (rotor): 0,65 m;

Vazão de gas nitrogênio: 4 kg/s

Pressão de trabalho: pressão atmosférica (760 Torr)

Velocidade do ventilador: 600 rpm;

Potencia do motor elétrico: 1 HP

Fator de eficiência: acima de 75%

Anexo 5

Telas de visualização de parâmetros da interface homem-máquina (IHM) do reator PADS

Programa

h min Passo < >

Temperatura passo: °C

Temperatura zona superior: °C

Temperatura zona central: °C

Temperatura zona inferior: °C

Programa

h min Passo

Temperatura passo: °C

Corrente de plasma passo: A

Corrente de plasma real: A

Tempo ligado (Ton): μs

Anexo 6

Vistas isométricas do reator PADS

