

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de São Carlos

Construção de um sistema de purificação de
argônio para a fusão de ligas reativas

Leandro Augusto Silva



São Carlos – SP
2010

Leandro Augusto Silva

**CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE PURIFICAÇÃO DE
ARGÔNIO PARA A FUSÃO DE LIGAS REATIVAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
Engenharia Mecânica da Escola de
Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Falcão de
Oliveira

São Carlos,SP
2010

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Candidato: Leandro Augusto Silva

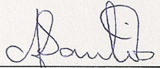
Título: Construção de um Sistema de Purificação de Argônio para a Fusão de Ligas Reativas.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo
Curso de Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA

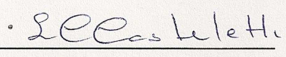
Prof. Dr. Antonio Moreira dos Santos

Nota atribuída: 6,0 (seis)


(assinatura)


Prof. Dr. Luiz Carlos Casteletti

Nota atribuída: 6,0 (seis)


(assinatura)

Prof. Dr. Marcelo Falcão de Oliveira (orientador)

Nota atribuída: 6,0 (seis)


(assinatura)

Média: 6,0 (seis)

Resultado: Aprovado

Data: 03/12/2010

RESUMO

SILVA, L. A. (2010). **Construção de um sistema de purificação de argônio para a fusão de ligas reativas**. Monografia – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

O presente projeto trata da construção de um sistema de purificação voltado ao sistema para a produção de peças metálicas amorfas de grande volume construído pelo projeto regular FAPESP (2006/00675-4).

Um fator muito importante no processamento de ligas metálicas vítreas é a concentração de oxigênio. Pequenas concentrações interferem no resultado final e pode acarretar na inviabilização da formação da estrutura.

O Sistema de getter tem como objetivo absorver gases ativos, nesse caso será utilizado especificamente para reduzir a pressão parcial do oxigênio dentro da câmara de fusão do forno citado.

Palavras-chave: getter; purificação; ligas reativas; ligas metálicas amorfas

ABSTRACTS

SILVA, L. A. (2010). **Construction of an argon purification system for melting reactive alloys**. Monograph – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

This project is about the construction of a purification system back to the system for the production of amorphous metal parts built by large volume of regular project FAPESP (2006/00675-4).

A very important factor in the processing of glassy alloys is the concentration of oxygen. Small concentrations interfere with the final result and may result in the inviability of structure formation.

The system aims to absorb getter active gases, in this case will be used specifically to reduce the partial pressure of oxygen inside the melting chamber of the oven cited.

Keywords: getter; purification; reactive alloys; bulk metallic glasses

LISTA DE ABREVIATURAS

VMM. Vidros metálicos maciços;

BMG. *Bulk metallic glasses*;

NEG. *Non-evaporable getters*.

LISTA DE SÍMBOLOS

T = temperatura

ξ = raio do canal entre as partículas do getter

P = pressão

λ = livre caminho médio

r = raio interno do cilindro

S = tensão admissível básica do material

C = coeficiente de eficiência da solda

e = espessura mínima

d = diâmetro do tubo

N = fator adimensional dependente do tipo de tampo e do sistema de fixação ao casco

F = força

K = coeficiente de elasticidade

A = área

E = módulo de elasticidade

L = comprimento

σ_a = tensão limite de fadiga do material

Q = vazão volumétrica

\dot{m} = vazão mássica

V = volume

v = velocidade do escoamento

m = massa

R = constante universal dos gases

M = massa molar

c_p = calor específico a pressão constante

k = razão de calores específicos

c = velocidade do som

r = raio

ρ = densidade

μ = viscosidade

Re = número de Reynolds

De = número de Dean

Nu = número de Nusselt

Pr = número de Prandtl

St = número de Stanton

SUMÁRIO

RESUMO.....	3
ABSTRACTS	5
LISTA DE ABREVIATURAS.....	6
LISTA DE SÍMBOLOS.....	7
1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 OBJETIVOS	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 GETTERS	13
2.1.1 CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES.....	13
2.1.2 TIPOS DE GETTERS.....	14
2.1.3 MATERIAIS PARA NEGS	15
2.2 LIVRE CAMINHO MÉDIO	16
2.3 DIMENSIONAMENTO DE VASOS DE PRESSÃO	17
2.4 BALANÇO DE ENERGIA – VOLUME DE CONTROLE	19
2.5 TRANSFERÊNCIA DE CALOR – CONDUÇÃO	19
2.6 TRANSFERÊNCIA DE CALOR – RADIAÇÃO	20
2.7 ANÁLISE DE ESCOAMENTO CONFINADO EM TUBO	21
2.7.1 NÚMERO DE MACK – COMPRESSIBILIDADE.....	21
2.7.2 NÚMERO DE REYNOLDS – REGIME DO ESCOAMENTO	22
2.7.3 PERDA DE CARGA – PACKED/FLUIDIZED BED	23
2.7.4 CORRELAÇÕES DE CONVECÇÃO – PACKED BED.....	25
2.7.5 CORRELAÇÕES DE CONVECÇÃO – TUBO HELICOIDAL.....	27
2.8 ANÁLISE DE ESCOAMENTO EM DUTOS –DIÂMETRO HIDRÁULICO	30
3 ESTUDO TEÓRICO DO PROJETO DEFINIDO.....	31
3.1 ESCOLHA DO MATERIAL DO GETTER	31
3.2 CÁLCULOS DE VERIFICAÇÃO E DIMENSIONAMENTO	32
4 CONSTRUÇÃO DOS COMPONENTES.....	33
4.1 LISTA DE MATERIAIS	33
4.2 FABRICAÇÃO E MONTAGEM.....	33
5 DISCUSSÃO	40

REFERÊNCIAS..... 41

1 INTRODUÇÃO

Os vidros metálicos maciços são materiais de alta resistência ao desgaste, grande limite de elasticidade, de resistência à corrosão e de propriedades magnéticas especiais. Os elementos constituintes dos VMM são caracterizados pelas grandes diferenças entre os raios atômicos, entalpia de mistura negativa entre os principais elementos e alta densidade de empacotamento atômico, que impedem a cristalização por motivos termodinâmicos e cinéticos, exigindo para sua formação taxas de resfriamento da ordem de 10 a 10^3 K/s.

A dificuldade voltada às ligas amorfas é fabricação de um grande volume dessas. O domínio dessas tecnologias está praticamente restrito a poucos grupos de pesquisadores, podendo-se destacar o grupo japonês do Prof. Inoue, da Tohoku University, o grupo americano do Prof. Johnson do California Institute of Technology e o grupo do Prof. Yavari do Institut National Polytechnique de Grenoble. Outra dificuldade durante o processamento de ligas metálicas vítreas é evitar qualquer variável ou inclusão que possa auxiliar a formação de cristais na estrutura desses materiais.

O oxigênio dentro do líquido dos *bulk metallic glasses* baseados em Zr dispara a nucleação e crescimento de várias fases como Zr_2Ni , Zr_2Cu , Zr_4Ni_2O e outras. As fases cristalinas formadas em BMGs dependem principalmente da composição da liga e condições de solidificação, como a taxa de resfriamento e o nível de oxigênio.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é a construção de um sistema de purificação capaz de remover permanentemente fases gasosas e gases liberados dos constituintes do sistema de vácuo. O getter é o componente de destaque do sistema de purificação, sendo o responsável por promover a adsorção de "impurezas" gasosas e atmosfera gasosa necessária para o bom funcionamento do sistema. Há várias publicações sobre fornos a arco que utilizam getter para a purificação do vácuo na câmara.

Os NEGs (non-evaporable getters), dentre os vários tipos de getters conhecidos, são os mais adequados para o sistema em questão. O mecanismo de funcionamento de um NEG ocorre com a absorção dos gases ativos em contato com uma superfície metálica limpa via reação química. Uma superfície metálica limpa é uma superfície metálica que não apresenta filmes óxidos ou de carbetos. Para a obtenção desta superfície limpa, o metal passa por um tratamento térmico chamado de ativação. A ativação expõe a superfície metálica à atmosfera da câmara e aumenta a cinética de difusão. Uma vez ativado, o processo de absorção dos gases ativos pode ser dividido em três passos. O primeiro passo é a dissociação das moléculas de gás que ocorre na superfície metálica. O segundo passo envolve a adsorção na superfície, que ocorre para qualquer gás ativo. O terceiro passo é a difusão que pode ou não ocorrer, dependendo da temperatura e natureza do gás.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 GETTERS

2.1.1 CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES

Os getters só começaram a serem efetivamente estudados a partir de 1950, apesar de sua existência ser conhecida desde a invenção da lâmpada incandescente, em 1879 por Thomas Edison. O estudo de absorvedores de gases prosseguiu produzindo diversos artigos em simpósios, geralmente ligados ao estudo do vácuo (WALTER, 1995). Suas principais aplicações são lâmpadas, tubos de raios catódicos, aceleradores de partículas, dispositivos microeletrônicos e bombas de vácuo (AMIOTTI, 2008).

O mecanismo de absorção de gases ativos ocorre de forma química. Por isso a composição e a forma da superfície dos materiais são fontes de interesse. A adsorção, absorção, dessorção, oxidação superficial e difusão, entre outros fenômenos, são muito importantes na eficiência dos getters (WALTER, 1995).

A adsorção dos gases só ocorre em contato com uma superfície metálica limpa. Uma superfície metálica limpa significa que a superfície do metal não apresenta filmes óxidos ou de carbetos, ausência de camada passiva. Para a obtenção desta superfície, o metal passa por um tratamento térmico chamado de ativação, esse consiste em submeter o metal do getter a uma temperatura na qual a camada passiva seja retirada em conjunto a um vácuo dinâmico ou destruída pela difusão do oxigênio para o interior do material. A ativação expõe a superfície metálica à atmosfera da câmara além de aumentar a cinética de difusão. Temperaturas próximas de 900° C são padrões para a ativação da maioria dos materiais de getter. O primeiro passo é a dissociação da molécula de gás que ocorre na superfície metálica. Depois, a adsorção na superfície, que ocorre para qualquer gás ativo. E por último a difusão que depende da temperatura e tipo de material e gás (ROTH, 1982; WALTER, 1995).

Os requisitos para materiais absorvedores (WALTER, 1995) são:

1. Estabilidade química para armazenamento, manuseio ao ar e limpeza em álcool ou água se necessário;
2. Estabilidade mecânica quanto a impacto e vibração, pois esses poderão fazer parte do processo de fabricação;
3. Estabilidade térmica abaixo da temperatura de ativação;
4. Fácil dessorção de gases antes da ativação;
5. Temperatura de ativação razoavelmente baixa, de modo a não superaquecer as outras partes adjacentes;
6. Não liberação de partículas durante e depois da ativação;
7. Habilidade de absorver vários gases diferentes presentes no tubo;
8. Capacidade de absorver um grande volume de gases, rapidamente;
9. Baixa taxa de dessorção, liberação de gases absorvidos, na temperatura de trabalho;
10. Estabilidade química na presença de bombardeamento de elétrons ou alta temperatura;
11. Baixa pressão de vapor antes e depois da ativação.

2.1.2 TIPOS DE GETTERS

Os *getters* costumam ser classificados em três grupos, de acordo com a forma em que o material fica ativo: flash, bulk e coating getters (ROTH, 1982).

Os *flash getters* ou absorvedores em filme são materiais voláteis. O material ativo é evaporado por meio de um aquecimento rápido e depositado como um filme na superfície interna do envelope (WALTER, 1995). É muito utilizado em lâmpadas incandescentes, válvulas diodo, tubos catódicos e outros equipamentos que não serão mais abertos depois de lacrados. Atuam absorvendo os gases que restam apesar da realização do vácuo mecânico, realizado antes do lacre, e absorvendo os gases liberados no processo de funcionamento do dispositivo, mantendo o vácuo. Os elementos mais utilizados para esse fim são: magnésio, bário, cálcio, tório, fósforo vermelho e algumas ligas como bário-alumínio, estrôncio-alumínio, cálcioalumínio e

alumínio- magnésio. O fósforo é o *getter* mais usado em lâmpadas incandescentes (ROTH, 1982).

Os *bulk* e *coating getters* são absorvedores não evaporáveis (NEGs). Por não serem evaporáveis eles apresentam alto ponto de fusão, pois são aquecidos a altas temperaturas para facilitar a difusão no sólido. São muito utilizados em tubos de elétrons. A diferença entre esses dois tipos está na forma do material. *Bulk getters* tem forma estrutural de lâminas, fitas, arames ou barras. *Coating getters* tem a forma de pó e geralmente são depositados em uma superfície (ROTH, 1982).

2.1.3 MATERIAIS PARA NEGS

Algumas das ligas que constam na literatura e mais usadas são:

- Zr/Al - A liga $Zr_{84}Al_{16}$ demonstrou ser a composição mais favorável desses elementos. Após 30 segundos na temperatura de ativação de 1000°C foram mantidos altos níveis de absorção para diferentes tipos de gases. A temperatura ótima de absorção é em 400°C (WALTER, 1995).

- Zr/Ti - A liga $Zr_{87}Ti_{13}$ é muito apropriada, pois perde seu filme superficial de óxido perto de 200°C e absorve bem os gases H_2 , O_2 , N_2 e CO_2 (WALTER, 1995).

- Th/Al/Ce - A liga $Th_{80}Al_5Ce_{15}$ também conhecida como CerAlloy 400 tem alta absorção para CO , CO_2 e H_2O , boa para H_2 , N_2 e O_2 e baixa para CH_4 . Ela pode atuar de 100°C à 1000°C, sua faixa de temperatura mais efetiva está entre 400°C e 600°C (WALTER, 1995).

- Ti/Zr/V - A liga $Ti_{29}Zr_{28}V_{43}$ que tem uma temperatura de ativação aproximada 200°C possui excelentes propriedades e é utilizada comercialmente pela SAES (TALLARICO).

- Ti/Zr/Fe – A liga $Ti_{40}Zr_{40}Fe_{20}$ pode ser produzida através de fusão a arco e fragmentada em pequenos pedaços para produzir uma grande área superficial. A temperatura de ativação nesse caso é cerca de $400^{\circ}C$, com rápida absorção de O_2 .

- Zr/V/Fe – A liga SAES St707 possui suas condições ótimas de ativação na faixa de aquecimento de $450^{\circ}C$ e $500^{\circ}C$. Uma vez que a liga é ativada, moléculas reativas, como a O_2 , H_2O , N_2 , CO , CO_2 e H_2 são adsorvidos através de um mecanismo de adsorção três etapas citadas anteriormente. Os hidrocarbonetos são absorvidos em menor velocidade de bombeamento em temperaturas acima de $200^{\circ}C$. Uma vez absorvidos, oxigênio, nitrogênio e átomos de carbono não pode ser liberado pelo St707 devido à formação de ligações químicas fortes com os átomos da liga. O Hidrogênio reage de forma diferente: ele difunde no volume St707 getter ainda mais rapidamente do que as outras espécies e que distribui quase uniformemente na massa, mesmo em baixas temperaturas.

2.2 LIVRE CAMINHO MÉDIO

Em mecânica estatística e teoria cinética dos gases, se define como percurso livre médio (ou livre caminho médio) à distância ou espaço entre duas colisões sucessivas das moléculas de um gás. Recordamos que num gás, suas moléculas estão em constante movimento chocando-se umas com as outras. A temperatura do gás é função da energia cinética destas. Por meio dos parâmetros macroscópicos do gás: pressão, volume e temperatura, estima-se o número de moléculas com a equação 1, de Clapeyron, e o número de Avogrado ($1 \text{ mol} = 6,02 \times 10^{23}$ moléculas), considerando a hipótese de gás ideal.

$$n = \frac{P.V}{R.T} \quad (1)$$

Onde:

n = número de moles do gás

P = presssão do gás

V = volume ocupado pelo gás

R = constante universal dos gases

T = temperatura do gás na escala absoluta

A partir da estimativa do número de moléculas, obtém-se o livre caminho médio λ pela equação 2.

$$\lambda = \frac{1}{\pi \cdot \tilde{n} \cdot \xi^2} \quad (2)$$

Onde:

\tilde{n} = quantidade de moléculas

ξ = raio do canal entre partículas

2.3 DIMENSIONAMENTO DE VASOS DE PRESSÃO

Seguindo as fórmulas e os critérios para o dimensionamento de vasos de pressão do Código ASME, seção VIII, divisão 1, tem-se considerações voltadas aos efeitos das pressões interna e externa. As fórmulas desse código são baseadas na teoria da membrana, contendo, entretanto, alguns coeficientes empíricos de correção. Dessa forma, não são levados em consideração os esforços de flexão decorrentes da espessura ou das descontinuidades geométricas (TELLES, 2003).

A espessura mínima do tubo do vaso de pressão é fornecida pela equação 3, equação que surge da teoria da tensão máxima circunferencial de membrana em um cilindro.

$$e_1 = \frac{P \cdot r}{S \cdot E - 0,6 \cdot P} \quad (3)$$

Onde:

e_1 = espessura mínima do tubo

P = pressão interna de projeto

S = tensão admissível básica do material

R = raio interno do cilindro

A espessura mínima do tampo circular é dada pela equação 4 (TELLES,2003).

$$e_2 = d \sqrt{\frac{N \cdot P}{S}} \quad (4)$$

Onde:

e_2 = espessura mínima do tampo

P = pressão interna de projeto

S = tensão admissível básica do material

d = diâmetro do tubo

N = fator adimensional dependente do tipo de tampo do sistema de fixação

A união aparafusada da flange é verificada de acordo com o cálculo do mínimo diâmetro de núcleo de cada parafuso pelas equações 5, 6, 7, 8 e 9 (TELLES,2003).

$$F_t = \left(\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot P_{\max} \right) / N \quad (5)$$

$$\Delta F_p = \frac{K_p}{K_p + K_c} \cdot F_t \quad (6)$$

$$F_a = \frac{\Delta F_p}{2} \quad (7)$$

$$A_t = \frac{F_a}{\sigma_a} \quad (8)$$

$$d_i = \sqrt{\frac{A_t \cdot 4}{\pi}} \quad (9)$$

Onde:

F_t = força de tração em cada parafuso

P_{\max} = pressão máxima de trabalho

d = diâmetro do tubo

N = número de parafusos

K_p = rigidez do parafuso
 K_c = rigidez da flange
 A_t = seção transversal de cada parafuso
 d_i = diâmetro do núcleo de cada parafuso

2.4 BALANÇO DE ENERGIA – VOLUME DE CONTROLE

Segundo Incropera, dado um volume de controle, a equação de balanço de energia, para qualquer instante de tempo t , é:

$$(\dot{E}_e + \dot{E}_g) - \dot{E}_s = \dot{E}_{ar} \quad (10)$$

Onde:

\dot{E}_e = taxa de energia que entra no volume de controle

\dot{E}_g = taxa de energia gerada no volume de controle

\dot{E}_s = taxa de energia que sai do volume de controle

\dot{E}_{ar} = taxa de energia armazenada no volume de controle

Para o caso de regime permanente, temos a anulação do termo \dot{E}_{ar} , assim a equação se reduz:

$$(\dot{E}_e + \dot{E}_g) - \dot{E}_s = 0 \quad (11)$$

2.5 TRANSFERÊNCIA DE CALOR – CONDUÇÃO

A transferência de calor por condução, considerando as hipóteses de transferência de calor unidimensional, regime permanente, propriedades constantes do material, seção transversal constante é regida pela Lei de Fourier (INCROPERA). A equação apresentada tem seus parâmetros ilustrados na Figura 1 é a equação 12.

(12)

Onde:

k = condutividade térmica do material

A = seção transversal na posição correspondente a x

L = comprimento da barra

T_1 = temperatura correspondente à superfície 1

T_2 = temperatura correspondente à superfície 2

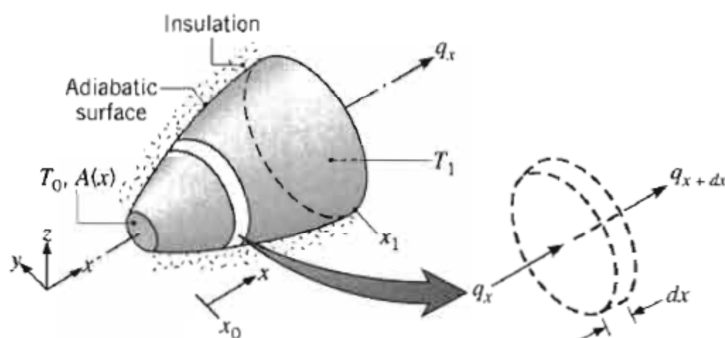


Figura 1 – Condução – Lei de Fourier

2.6 TRANSFERÊNCIA DE CALOR – RADIAÇÃO

A transferência de calor por radiação está associada ao transporte por ondas eletromagnéticas. Esse processo é regido pela Lei de Stefan – Boltzmann. A equação, cujas hipóteses são: Regime permanente, emissividade da superfície aproximadamente igual à absorvidade de sua vizinhança, e que descreve esse fenômeno é a equação 13, cujos parâmetros são ilustrados na Figura 2 (INCROPERA).

(13)

Onde:

ε = emissividade do corpo

σ = constante de Stefan – Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)

A = superfície do corpo radiante

T_1 = temperatura correspondente à superfície 1

T_∞ = temperatura correspondente à vizinhança

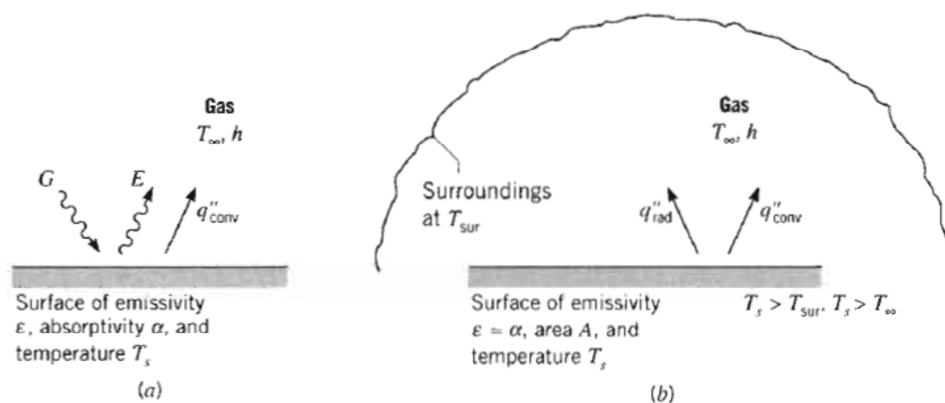


Figura 2 – Radiação – Lei de Stefan-Boltzmann

2.7 ANÁLISE DE ESCOAMENTO CONFINADO EM TUBO

2.7.1 NÚMERO DE MACK – COMPRESSIBILIDADE

Escoamentos em que as variações na massa específica são desprezíveis denominam-se *incompressíveis*; quando as variações de massa específica não são desprezíveis, o escoamento é chamado de *compressível*.

Os escoamentos de gases com transferência de calor desprezível também podem ser considerados incompressíveis, desde que as velocidades do escoamento sejam pequenas quando comparadas com a velocidade do som no próprio gás. A razão entre a velocidade do escoamento, V , e a velocidade local do som, c , no gás, é definida como o número de Mach:

$$c = \sqrt{k \cdot R \cdot T} \quad (14)$$

$$M = \frac{V}{c} \quad (15)$$

Onde:

k = razão entre o calor específico à pressão constante (c_p) e o calor específico à volume constante (c_v)

R = constante universal dos gases

T = temperatura do gás na escala absoluta

c = velocidade local do som no gás

V = velocidade do escoamento

Por meio do estudo do número de Mack, é fornecido um parâmetro para a consideração de compressibilidade ou incompressibilidade do escoamento do fluido.

Para $M < 0,3$, a variação máxima da massa específica é inferior a 5%. Assim, os escoamentos de gases com $M < 0,3$ podem ser considerados incompressíveis (FOX, 2006).

2.7.2 NÚMERO DE REYNOLDS – REGIME DO ESCOAMENTO

Para escoamentos confinados em tubos, é importante saber as características do escoamento tais quais o regime de escoamento, o desenvolvimento deste ao longo do comprimento do tubo entre outros parâmetros analisados por adimensionais específicos.

O adimensional de Reynolds, Re , como significado físico, é a razão entre forças de inércia e forças viscosas no fluido. É expresso na equação 16.

Onde:

= densidade do fluido

= velocidade média do fluido na seção transversal

D = diâmetro interno do tubo

= viscosidade do fluido

Para um escoamento se caracterizar como laminar, o número de Reynolds deve ser inferior a 2300 . Acima desse valor, conforme pode se ver no diagrama de Moody ilustrado na Figura 3, temos a transição para turbulência. Após essa faixa de transição, temos um regime de turbulência que também depende da rugosidade relativa do tubo além do número de Reynolds (INCROPERA, 2003).

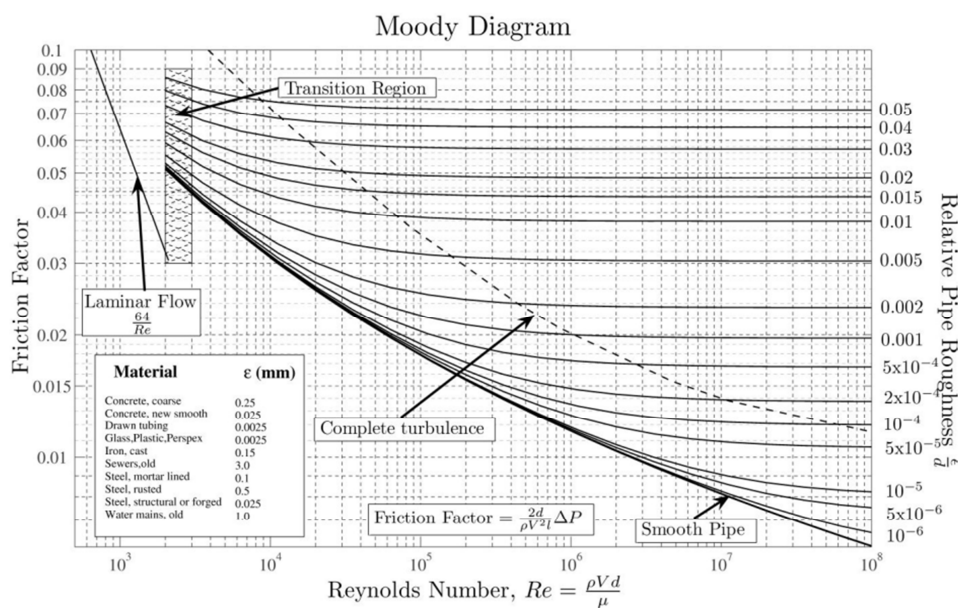


Figura 3 – Diagrama de Moody

2.7.3 PERDA DE CARGA – PACKED/FLUIDIZED BED

O termo *packed bed*, leito compactado, se refere a uma condição na qual as partículas do meio poroso, ao qual fazem parte, se mantêm fixas. Em contraste a essa

condição, tem-se o leito fluidizado, designado por *fluidized bed*, no qual as partículas se movem devido a advecção do fluido (BIRD, 1960).

A equação 17 é a equação de perda de carga de Blake-Kozeni, utilizada em *packed beds*.

A equação 18 é a equação de perda de carga de Ergun, que reúne as equações de Blake-Kozeni e Burke-Plummer, utilizada em *fluidized beds*. A Figura 4 ilustra o escoamento através de um *packed bed* (INCROPERA, 2003).

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150 \mu V_0}{D_p^2} \left(\frac{1 - \epsilon}{\epsilon^3} \right) + \frac{1.75 \rho V_0^2}{D_p} \left(\frac{1 - \epsilon}{\epsilon^3} \right) \quad (\text{packed bed}) \quad (17)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150 \mu V_0}{D_p^2} \left(\frac{1 - \epsilon}{\epsilon^3} \right) + \frac{1.75 \rho V_0^2}{D_p} \left(\frac{1 - \epsilon}{\epsilon^3} \right) \quad (\text{fluidized bed}) \quad (18)$$

Onde:

μ = viscosidade do fluido

ρ = densidade do fluido

L = comprimento do leito

V_0 = velocidade a montante do leito

D_p = diâmetro da partícula, modelada como esfera

ϵ = porosidade dada pela razão entre volume de vazios e volume total do leito

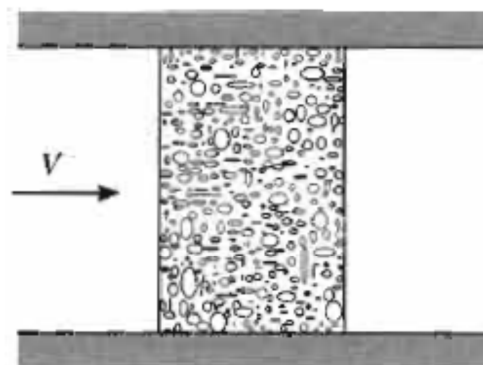


Figura 4 – Escoamento através de um leito compactado (Packed Bed)

O número de Reynolds da partícula, Re_p , cujos parâmetros foram apresentados anteriormente, é calculado pela equação 19.

$$Re_p = \frac{D_p \cdot v_0 \cdot \rho}{(1-\epsilon) \cdot \mu} \quad (19)$$

Para que se possa utilizar as equações 17 e 18, deve-se garantir que $Re_p < 10$ e que $\epsilon < 0,5$.

2.7.4 CORRELAÇÕES DE CONVECÇÃO – PACKED BED

É importante introduzir mais três adimensionais muito utilizados no tratamento de escoamentos, o número de Prandtl, o número de Nusselt e o número de Stanton, respectivamente, Pr , Nu e St .

O adimensional de Prandtl, Pr , como significado físico, é a razão entre difusividade de momento e difusividade térmica, ou seja, fornece um parâmetro que compara as regiões de entrada nos escoamentos confinados em tubo quanto à questão do desenvolvimento camada limite de velocidade frente ao desenvolvimento da camada limite de temperatura. O número de Prandtl, Pr , é expresso na equação 20.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (20)$$

Onde:

ν = viscosidade cinemática do fluido ($\nu = \mu/\rho$)

α = difusividade térmica do fluido ($\alpha = k_f/\rho \cdot c_p$)

O adimensional de Nusselt, Nu, como significado físico, é a razão entre a capacidade de transferência de calor por convecção e a de transferência por pura condução. O número de Nusselt, Nu, é expresso na equação 21.

$$\text{Nu} = \frac{h \cdot D}{k_f} \quad (21)$$

Onde:

h = coeficiente de transferência convectiva

D = diâmetro interno do tubo

k_f = condutividade térmica do fluido

O adimensional de Stanton, St, é o adimensional que reúne os adimensionais, Nu, Re e Pr. O número de Stanton é expresso na equação 22.

$$\text{St} = \frac{\text{Nu}}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \quad (22)$$

Onde:

Nu = número de Nusselt

Re = número de Reynolds

Pr = número de Prandtl

Para um leito compactado, uma grande quantidade de fluxo de calor e massa pode ser obtido em virtude da boa relação entre superfície total de troca e volume do leito.

Uma correlação, respeitando-se as condições voltadas aos adimensionais Re e Pr é apresentada na equação 23 (INCROPERA, 2003).

$$\text{Nu} = \frac{2,06}{\epsilon} \text{Re}^{0,425} \cdot \text{Pr}^{1/3} \quad \left[\begin{array}{l} \text{Pr} \approx 0,7 \\ 90 \leq \text{Re} \leq 4000 \end{array} \right] \quad (23)$$

Onde:

ϵ = porosidade dada pela razão entre volume de vazios e volume total do leito

Re = número de Reynolds

Pr = número de Prandtl

2.7.5 CORRELAÇÕES DE CONVECÇÃO – TUBO HELICOIDAL

Em tubos helicoidais, a taxa de transferência de calor é superior quando comparada ao caso de tubo reto de mesmo diâmetro, pelo fato de forças centrífugas induzirem *fluxo secundário* (consistindo em um par de vórtices longitudinais) conforme ilustra a Figura 5 (INCROPERA, 2003).

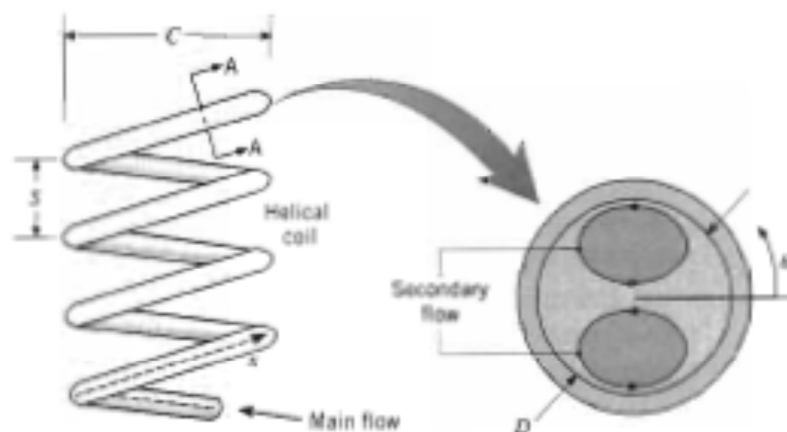


Figura 5 – Fluxo secundário em tubo helicoidal

O adimensional de Dean, De , pode ser interpretado como “Reynolds corrigido”. Utilizado em escoamentos confinados em tubos helicoidais, o número de Dean é expresso na equação 24.

$$\begin{aligned} & - \\ & - \end{aligned} \tag{24}$$

Onde:

D = diâmetro interno do tubo (Figura 5)

C = diâmetro do enrolamento espiralado (Figura 5)

Re = número de Reynolds

A análise do escoamento é feita a partir da comparação do número de Dean com o número crítico, $Re_{D,C}$, calculado na equação 25.

$$Re_{D,C} = 2300 \left[1 + 12 \sqrt{\frac{D}{C}} \right] \quad (25)$$

Para um escoamento em tubo helicoidal se caracterizar como laminar, o número de Dean deve ser inferior ao número crítico $Re_{D,C}$.

Uma correlação para regime laminar, respeitando-se as condições voltadas aos adimensionais Re e Pr é apresentada na equação 26 (SHAH; JOSHI, 1987)

$$Nu = \left[\left(3,66 + \frac{4,343}{a} \right)^3 + 1,158 \left(\frac{Re \cdot (D/C)^{1/2}}{b} \right)^{3/2} \right]^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (26.1)$$

$$a = \left(1 + \frac{927(C/D)}{Re^2 \cdot Pr} \right) \quad (26.2)$$

$$b = 1 + \frac{0,477}{Pr} \quad (26.3)$$

$$\left[\begin{array}{l} 0,005 \leq Pr \leq 1600 \\ 1 \leq De \leq 1000 \end{array} \right]$$

Onde:

D = diâmetro interno do tubo (Figura 5)

C = diâmetro do enrolamento espiralado (Figura 5)

Re = número de Reynolds

Pr = número de Prandtl

μ = viscosidade do fluido avaliada na temperatura média, $T_m = (T_{m,i} + T_{m,o})/2$

μ_s = viscosidade do fluido avaliada na temperatura da superfície, T_s

Uma correlação estimada por CFD para regime em transição para turbulência, respeitando-se as condições voltadas aos adimensionais Re e Pr é apresentada na equação 27, cujos parâmetros são ilustrados na Figura 6. A Figura 7 ilustra um estudo de caso particular dos autores da correlação (JAYAKUMAR; MAHAJANI; MANDAL; VIJAYAN; BHOI, 2007).

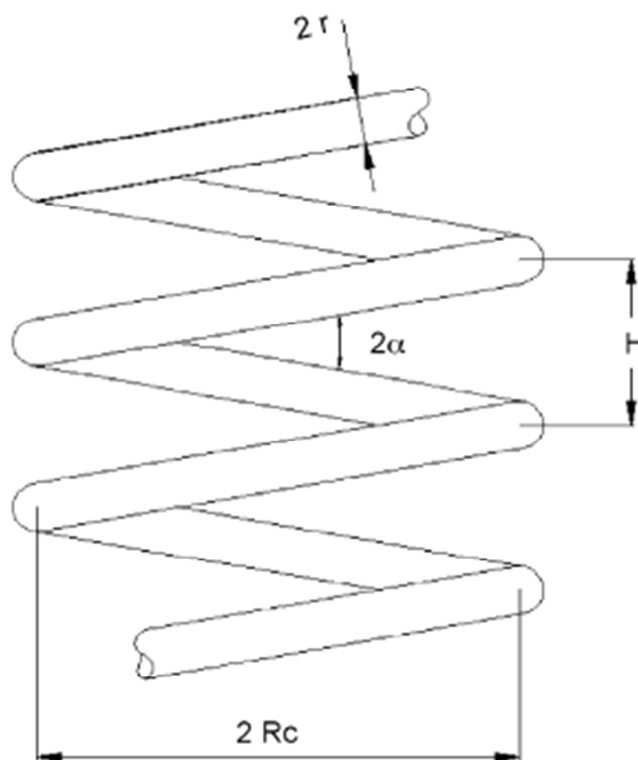


Figura 6 – Parâmetros geométricos básicos – tubo helicoidal

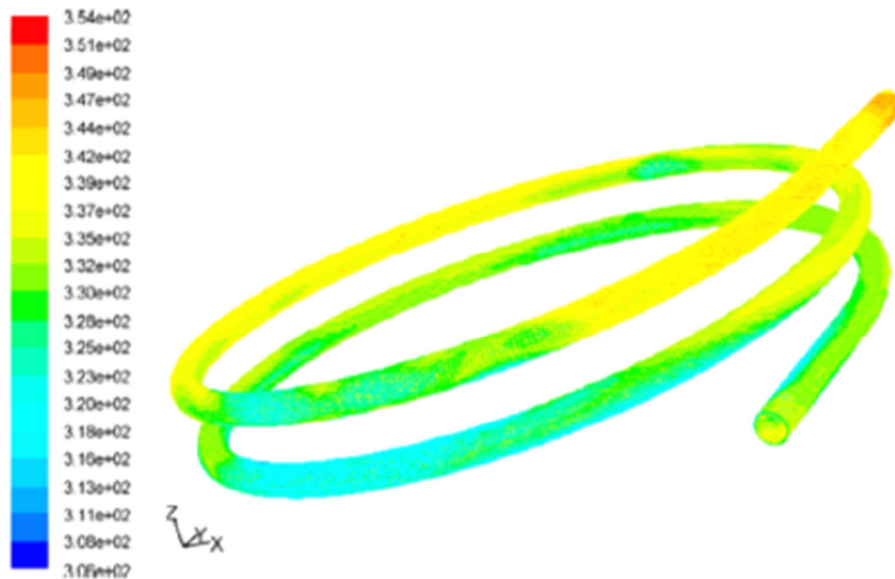


Figura 7 – Contorno de temperatura do fluido em tubo helicoidal

(27)

Onde:

De = número de Dean

Pr = número de Prandtl

2.8 ANÁLISE DE ESCOAMENTO EM DUTOS –DIÂMETRO HIDRÁULICO

Para os casos em que a seção do duto não é circular, tem-se um tratamento diferente quanto ao cálculo do número de Reynolds.

O diâmetro hidráulico, apresentado na equação 28, deve ser utilizado na equação 29.

— (28)

Onde:

A_c = seção transversal do duto com fluido

P = perímetro molhado (comprimento das fronteiras de A_c em contato com fluido)

$$Re_{D_h} = \frac{\dot{m}.D_h}{\mu.A_c} \quad (29)$$

Onde:

A_c = seção transversal do duto com fluido

D_h = diâmetro hidráulico

\dot{m} = vazão mássica

μ = viscosidade do fluido

3 ESTUDO TEÓRICO DO PROJETO DEFINIDO

3.1 ESCOLHA DO MATERIAL DO GETTER

As fases cristalinas formadas em VMM dependem principalmente da composição da liga e condições de solidificação, como o nível de oxigênio e taxa de resfriamento. Por isso o principal objetivo desse sistema é absorver o oxigênio e seus compostos presentes no fluxo de argônio.

O dispositivo em discussão será usado para a absorção do oxigênio de um fluxo de argônio com vazão máxima de projeto de 30 l/ min. O uso mais comum de getter está ligado à afinação do vácuo, ou seja, absorção de vestígios de gases deixados apesar do sistema de vácuo mecânico. Nesse contexto, é perceptível que a taxa de oxigênio a ser absorvida pelo sistema deve ser considerável, mesmo que esteja no nível de ppbs.

Como fonte de aquecimento, será usado um forno resistivo tubular já existente. Sua capacidade de aquecimento vai até 1000°C, tem o volume interno máximo de um cilindro de 80 mm de diâmetro e 200 mm de altura. A região de aquecimento mais uniforme compreende um cilindro de 70 mm de diâmetro e 100 mm de altura, logo, esse deve ser o volume máximo de material ativo utilizado.

Um material propício para a aplicação em questão é a liga St707 da SAES Getters. A temperatura de trabalho favorável é 500°C.

O valor da constante de difusividade do O₂ na liga não foi encontrado, por isso foi estimada a partir da difusividade do O₂ em outros metais puros de semelhante tamanho atômico aos metais da liga em questão. A partir dessa constante e usando a 1ª Lei de Fick (CALLISTER, 2006) foi possível encontrar a relação entre a necessidade de absorção e a capacidade de difusão para uma amostra de Ti a 500°C. Para uma vazão de 2 ppb de O₂ no fluxo de argônio, na temperatura de operação desejada e para partículas de 1mm de diâmetro, em condições muito mais favoráveis do que as perspectivas reais, a grandeza dessa relação foi estimada. Ainda assim a capacidade de difusão se mostrou mais de 1000 vezes menor do que a necessidade de absorção. Desse modo haverá a saturação da superfície muito antes da saturação da capacidade total e após a saturação da superfície, a velocidade de absorção será intensamente reduzida. Assim sendo, a restrição do limite de desempenho é velocidade de difusão no material e não a capacidade de adsorção.

Para diminuir a dependência da difusão deve-se aumentar a área superficial tanto quanto possível, além disso, deve-se empregar o maior volume de material possível para retardar a saturação da superfície. A característica frágil da liga escolhida contribui muito para facilitar a fragmentação do material e aumentar a área superficial. Outros materiais foram descartados porque temperaturas de trabalho maiores dificultarão muito o resfriamento.

A liga St707 será adquirida da SAES Getters e sua especificação se encontra na seção Anexos.

3.2 CÁLCULOS DE VERIFICAÇÃO E DIMENSIONAMENTO

Os cálculos de verificação e dimensionamento da cápsula do getter e do trocador de calor casco e tubo foram feitos em planilha anexa na mídia eletrônica que acompanha esta monografia.

Para os cálculos de verificação e dimensionamento do tubo e da flange da cápsula do getter foi utilizado o livro de vasos de pressão, tendo como suporte o Código ASME, seção VIII, (TELLES, 2003).

Para os cálculos de transferência de calor, foram levantadas todas as propriedades dos materiais e fluidos utilizados, de acordo com variações de temperatura e pressão. A hipótese de propriedades constantes avaliadas na temperatura média e na pressão de trabalho foi aplicada.

Uma ilustração da planilha eletrônica é apresentada no APÊNDICE C.

4 CONSTRUÇÃO DOS COMPONENTES

4.1 LISTA DE MATERIAIS

Os materiais listados na Tabela 1 a seguir foram selecionados e dimensionados segundo cálculos em anexo na mídia eletrônica que acompanha este relatório. Seus respectivos desenhos técnicos voltados à fabricação se encontram em anexo na mídia eletrônica.

Tabela 1– Lista de materiais adquiridos

Descrição	Quantidade
Disco de aço inox 304 L com diâmetro de 120 mm e espessura de ½ polegada	2
Disco de aço inox 304 L com diâmetro de 70 mm e espessura de 7/16 polegada	1
Chapa de aço inox 304 L com dimensões: 200 mm por 210 mm e espessura de 3/16 polegada	1
Tubo de cobre de diâmetro nominal 1/4 polegada e comprimento 6 metros	1
Tubo de inox 304L de diâmetro nominal 1/4 polegada e comprimento 6 metros	1

4.2 FABRICAÇÃO E MONTAGEM

A construção do tubo do getter foi feita por soldagem de acordo com as normas de construção de vasos de pressão. Um tipo de solda adequado para o aço 304L é AWS ER-308L para o processo TIG, também podem ser utilizados outros métodos de soldagem.

Primeiro, foi montada a flange usinada com o tubo de chapa calandrada.

A solda entre a flange e o casco apresentou profundidade do cordão de solda no mínimo 70% da espessura da parede do casco.

A solda entre o casco e o fundo foi do tipo de topo com penetração total (TELLES, 2003).

A Figura 8 é uma fotografia dos blanques antes de serem usinados. A Figura 9 é uma fotografia da chapa antes de ser calandrada. Após a calandragem, o tubo foi soldado e sua configuração após a soldagem é mostrada na Figura 10. As figuras 11 e 12 são, respectivamente, a tampa com o o'ring incluso e a cápsula do getter, ambos finalizados.



Figura 8 – Blanques utilizados: 1– Fundo da cápsula; 2– Tampa; 3– Flange

As soldas dos tubos de entrada e saída do argônio tem função de vedação e alta resistência mecânica não é necessária.

Na entrada do tubo serão colocadas duas válvulas. A primeira para permitir o escape do gás caso haja um aumento de pressão devido à perda de carga ao passar pelo getter. A outra válvula, que também será instalada na saída do trocador de calor, irá impedir que em caso de vazamento o ar atmosférico entre no tubo.

Na montagem do sistema é importante observar o sentido dos fluxos dos fluidos e a montagem correta das válvulas de segurança.



Figura 9 – Chapa antes de ser calandrada



Figura 10 – Configuração após calandragem e soldagem

Caso o ar atmosférico entre em contato com o getter em estado ativado, a quantidade excessiva de oxigênio causará uma grande liberação de energia, que poderá gerar danos ao sistema. O getter será instalado em um local isolado para evitar acidentes.

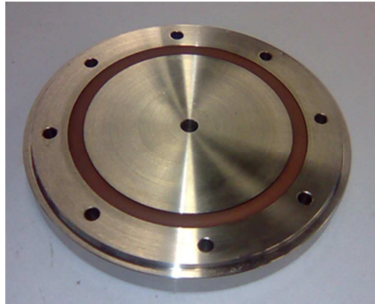


Figura 11 – Tampa com o o'ring



Figura 12 – Cápsula do getter finalizada

As Figuras 8,9 e 10 mostram o CAD da cápsula, do trocador de calor e o layout conjunto completo do *getter* respectivamente.

Os detalhes da soldagem estão ilustrados nas Figura 11 e 12.

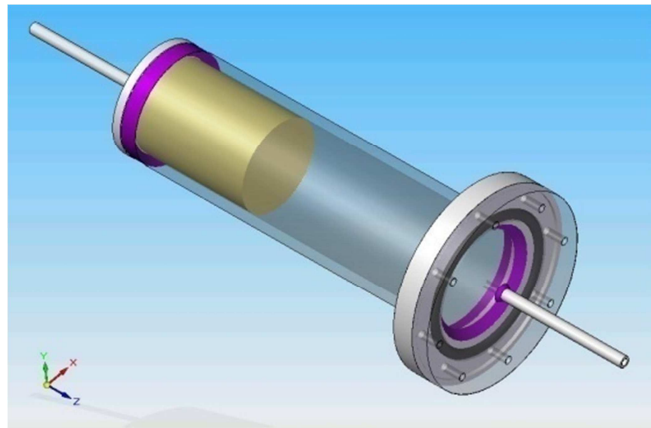


Figura 8 – Cápsula do getter

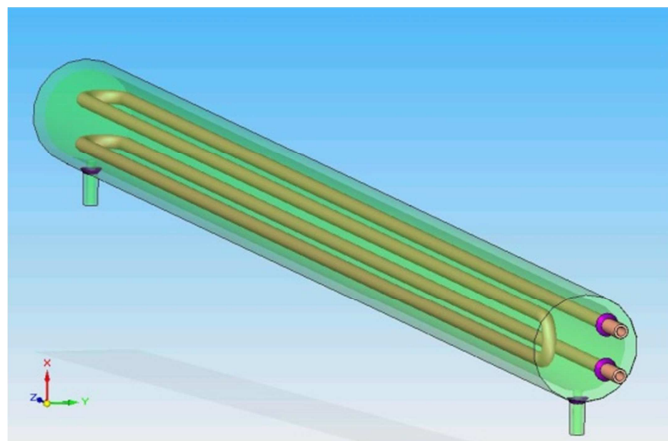


Figura 9 – Trocador de calor

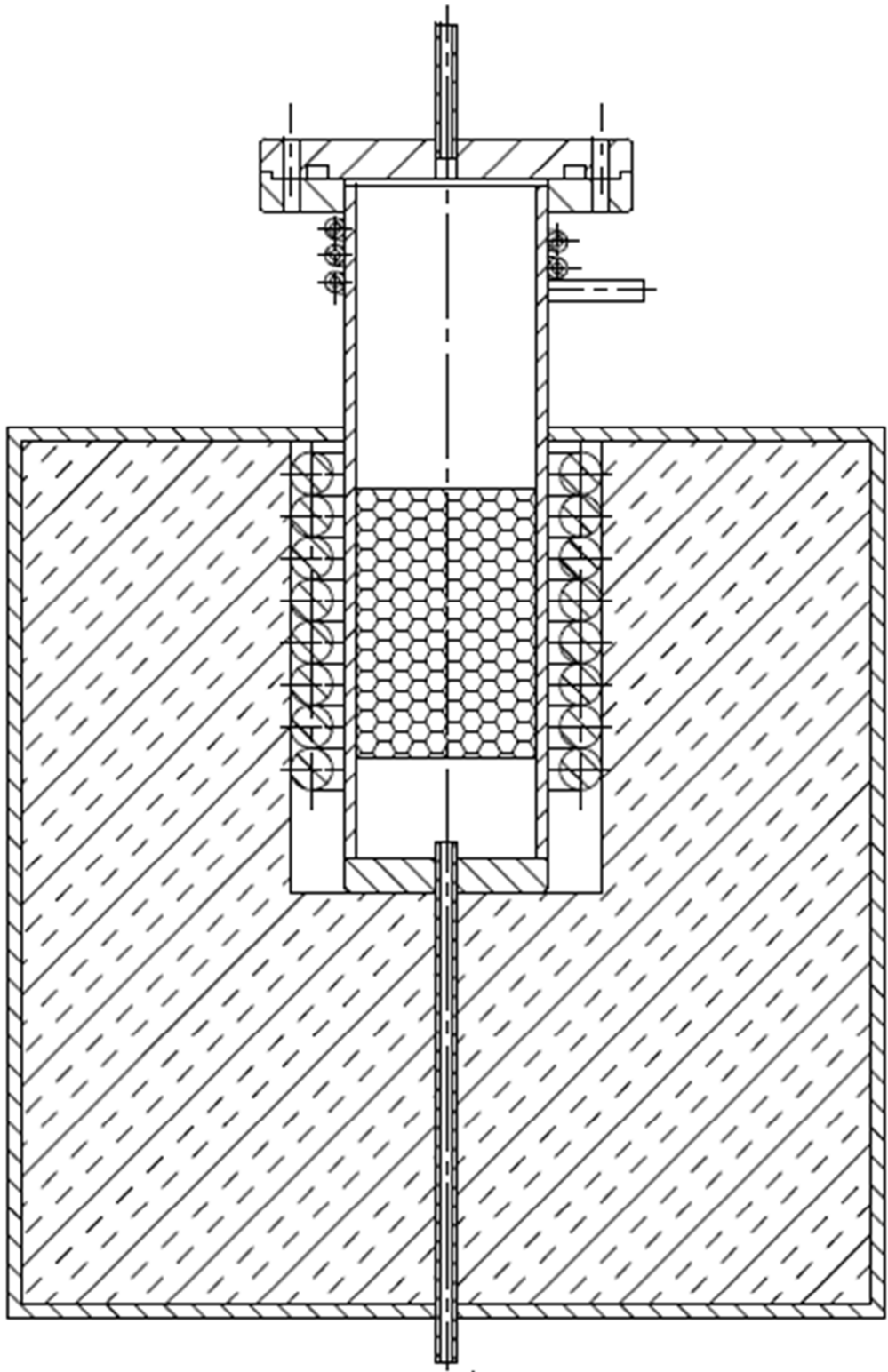


Figura 10 – Conjunto completo montado

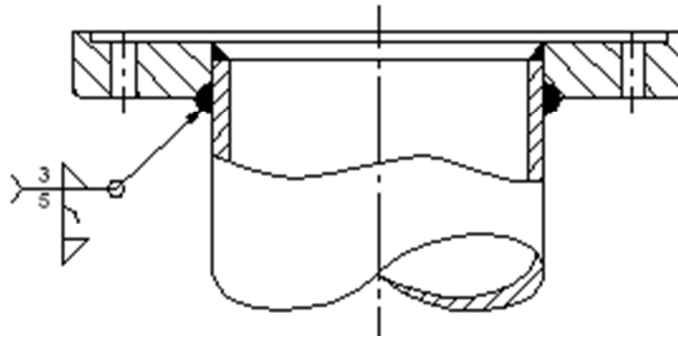


Figura 11 – Detalhe da soldagem da flange da cápsula

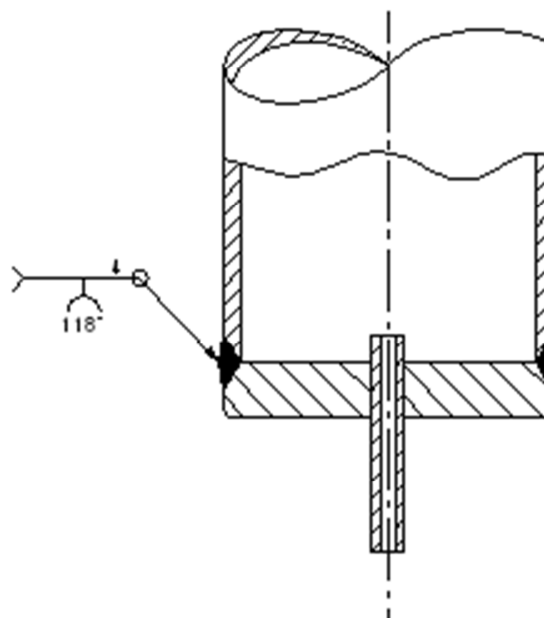


Figura 12 – Detalhe da soldagem do fundo da cápsula

5 DISCUSSÃO

A liga escolhida apresenta excelentes propriedades de absorção, baixa temperatura de ativação, fácil obtenção e possibilidade de fragmentação. A cápsula deve resistir à temperatura de 500°C e a um grande aumento de pressão em caso de infiltração de oxigênio.

As medidas de oxigênio realizadas nas amostras já produzidas mostram que essas estão absorvendo oxigênio no processo de fusão apesar da atmosfera inerte. Com a redução de oxigênio no fluxo através do getter as amostras de vidros metálicos maciços serão obtidas mais facilmente.

O projeto apresentou uma grande variedade de conceitos abordados, tanto conceitos de resistência dos materiais, quanto conceitos de processos de transferência de calor.

O funcionamento do sistema e sua validação são visados em estudos posteriores.

REFERÊNCIAS

- AMIOTTI, M. **Evolution of Gettering Technologies for Vacuum Tubes to Getters for MEMs. International Symposium on “Vacuum Science and Technology”** – IOP Publishing – Journal of Physics: Conference Series 114 – 2008.
- BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. Jr. **Resistência dos materiais**. Terceira edição – São Paulo: Pearson Makron Books – 2006.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E. **Transport Phenomena**. New York: John Wiley & Sons – 1960.
- CALLISTER, W. D. Jr. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Abordagem Integrada**. Segunda edição – Rio de Janeiro: LTC – 2006.
- FOX, R. W.; McDONALD, A. T., Pritchard, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Sexta Edição – Rio de Janeiro: LTC – 2006.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. Quinta edição – Rio de Janeiro: LTC – 2003.
- JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentos do Projeto de Componentes de Máquinas**. Quarta edição – Rio de Janeiro: LTC – 2008.
- JAYAKUMAR, J.S.; MAHAJANI, S.M; MANDAL, J.C.; VIJAYAN, P.K.; BHOI, R. **Experimental and CFD estimation of heat transfer in helically coiled heat exchangers**. Mumbai, India, 2007.
- Manual de o´ring**. São Paulo: Parker Seals – 2007.
- MEETHAM, G. W.; VAN de VOORDE, M. H. **Materials for High Temperature Engineering Applications**. Berlin: Springer – 2000.
- OZISIK, M. N. **Transferência de Calor – Um Texto Básico**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan – 1990.
- ROTH, A. **Vacuum Technology**. Edição revisada – New York: North-Holland Publishing Company – 1982.
- TALLARICO, D. A.; FERREIRA, M. J.; NASCENTE, P. A. P. **Preparação e caracterização de filmes finos de Ti-Zr-V usados como absorvedores não evaporáveis de gás em ultra-alto vácuo**.
- TELLES, P. C. S. **Vasos de pressão**. Rio de Janeiro: LTC – 2003.

WALTER, K. H. **Handbook of Materials and Techniques for Vacuum Devices**. New York: AIP Press – 1995.