

PAULO EDUARDO ALVES DE ARAÚJO

*Note final
9,7 (nove e sete)
WAM*

**DESENVOLVIMENTO DE CÂMARA TÉRMICA E REALIZAÇÃO DE
ENSAIOS DE TRAÇÃO COM O COBRE ELETROLÍTICO EM
DIFERENTES TEMPERATURAS**

Trabalho de formatura do curso de graduação do Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Professor Orientador: Edison Gonçalves

São Paulo
2005

PAULO EDUARDO ALVES DE ARAÚJO

**DESENVOLVIMENTO DE CÂMARA TÉRMICA E REALIZAÇÃO DE
ENSAIOS DE TRAÇÃO COM O COBRE ELETROLÍTICO EM
DIFERENTES TEMPERATURAS**

Trabalho de formatura do curso de graduação do Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Professor Orientador: Edison Gonçalves

Área de concentração:
Engenharia mecânica

São Paulo
2005

AGRADECIMENTOS

Ao professor Edison Gonçalves, pela grande dedicação à tarefa de orientação.

Aos colegas do Centro de Estruturas Navais e Oceanográficas (CENO), Nelson, Miguel e Kim, pela amizade e colaboração.

Ao professor Luiz Eduardo Lopes pela colaboração na fase de projeto.

Ao Dr. Arnaldo pelas sugestões fornecidas.

A minha família pela compreensão e colaboração.

A Laura pelo apoio e compreensão.

Ao Deus de Israel por Jesus Cristo.

ÍNDICE

Listas de figuras	I
Listas de tabelas	II
Listas de símbolos	IV
Resumo	V
Abstract	VI

CAPÍTULO I

I. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais.....	1
1.2 Justificativa e relevância do trabalho.....	2

CAPÍTULO II

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA ELEMENTAR

2.1 Propriedades mecânicas dos materiais.....	3
2.2 Deformação elástica em materiais metálicos.....	7
2.3 Deformação plástica em materiais metálicos.....	7
2.4 Influência da temperatura nas propriedades mecânicas dos materiais.....	9

CAPÍTULO III

III. PROJETO DA CÂMARA

3.1 Etapas de projeto.....	13
3.2 Pesquisa e análise bibliográfica.....	14
3.3 Levantamento de requisitos.....	14
3.4 Projeto da câmara.....	16

CAPÍTULO IV

IV. FABRICAÇÃO, MONTAGEM E INSTRUMENTAÇÃO DO EQUIPAMENTO

4.1 Fabricação e montagem da câmara.....	28
4.2 Instrumentação da câmara.....	29

CAPÍTULO V

V. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO COBRE ELETROLÍTICO

5.1 Especificação dos ensaios.....	32
5.2 Considerações adicionais sobre os ensaios.....	33
5.3 Resultados experimentais.....	34

CAPÍTULO VI

VI. CONCLUSÕES

6.1 Considerações a cerca do desenvolvimento da câmara.....	37
6.2 Considerações a cerca do comportamento mecânico do cobre.....	38
eletrólítico em temperaturas acima da ambiente.	
6.3 Recomendações para trabalhos futuros.....	39

LISTA DE FIGURAS

FIGURAS	PÁG
FIGURA 2.1 Curva tensão-deformação de engenharia	4
FIGURA 2.2 Curva tensão-deformação para pequenos deslocamentos (Conceito de módulo de Young)	5
FIGURA 2.3 Conceito de curva real e de engenharia	6
FIGURA 2.4 Discordâncias em cunha e hélice	8
FIGURA 2.5 Deslocamento de discordâncias em cunha	8
FIGURA 2.6 Deslocamento de discordâncias em hélice	9
FIGURA 2.7 Curva Tensão-deformação de um aço a diferentes temperaturas	11
FIGURA 3.1 Circuito térmico	19
FIGURA 3.2 Máquina do PMR	24
FIGURA 3.3 Vista frontal da câmara	25
FIGURA 3.4 Corte A-A da câmara	26
FIGURA 3.5 Projeção obliqua da câmara	26
FIGURA 3.6 Ilustração do conjunto	27
FIGURA 4.1 Desenho de conjunto da estrutura da câmara	28
FIGURA 4.2 Esquema de montagem	29
FIGURA 4.3 Ação de controle on-off	30
FIGURA 4.4 Termostato RAINBOW 320 R	30
FIGURA 4.5 Esquema de montagem do sistema de controle	31
FIGURA 5.1 Geometria dos corpos de prova de cobre eletrolítico	32
FIGURA 5.2 Módulo de elasticidade do cobre eletrolítico em função da temperatura	35
FIGURA 5.3 Tensão de escoamento do cobre eletrolítico em função da temperatura	35
FIGURA 5.4 Limite de resistência mecânica do cobre eletrolítico	36

em função da temperatura

FIGURA 5.5 Alongamento do cobre eletrolítico em função da temperatura

36

LISTA DE TABELAS

TABELAS		PÁG
TABELA 3.1	Cronograma físico	14
TABELA 3.2	Propriedades do elemento resistivo de aquecimento	22
TABELA 5.1	Propriedades mecânicas do cobre eletrolítico	34

LISTA DE SIMBOLOS

S_u	Límite de resistência mecânica
σ_e	Tensão de escoamento
σ_r	Tensão de ruptura
E	Módulo de elasticidade
ϵ	Deformação
P_E	Potência que entra no volume de controle
P_s	Potência que sai do volume de controle
P_{AC}	Potência acumulada no volume de controle
P_G	Potência gerada no volume de controle
h	Coeficiente convectivo
A	Área superficial
T	Temperatura
T_{SUP}	Temperatura na superfície
Bi	Número de Biot
K	Condutividade térmica
l	Comprimento característico
r	Raio
ρ_e	Resistividade elétrica do material
T_a	Temperatura do ambiente interno da câmara
V	Tensão elétrica
t	Tempo
ρ	Peso específico
C_p	Calor específico
A_{ST}	Área da secção transversal

RESUMO

Este trabalho de formatura objetiva o desenvolvimento de uma câmara térmica a qual possibilitará a realização de ensaios de tração de materiais em temperaturas acima da ambiente. Esta deverá ser acoplada a uma máquina de ensaios de tração, de forma que o conjunto máquina de ensaios e câmara seja capaz de atingir o objetivo proposto. A concepção da câmara engloba o projeto, a fabricação, a integração de componentes e testes do equipamento.

ABSTRACT

The objective of this work is the development of a thermal chamber which will make possible the accomplishment of assays of traction of materials in temperatures above of the environment. This will have to be connected to a machine of traction assays, of form that the joint machine of assays and chamber is capable to reach the considered objective. The development of the chamber involves the project, the manufacture, the integration of components and tests of the equipment.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O presente trabalho de formatura objetiva o desenvolvimento de uma câmara térmica para realização de ensaios de tração em temperaturas acima da ambiente. Além disso, a câmara desenvolvida é utilizada para a avaliação do comportamento mecânico do cobre eletrolítico em diferentes temperaturas. Um aspecto relevante associado ao trabalho desenvolvido é o foco acadêmico. A câmara concebida será utilizada para pesquisas científicas e como ferramenta didática nos cursos de graduação.

Existem muitas câmaras térmicas comerciais disponíveis no mercado. Entretanto, estas são desenvolvidas especialmente para determinados modelos comerciais de máquinas de ensaio de tração. Esta particularidade das câmaras comerciais está associada a sua dependência da geometria da máquina de ensaio a qual elas devem ser acopladas. Desta forma, o trabalho apresentado aqui visa desenvolver uma câmara térmica que seja compatível com a máquina de ensaios do PMR (Departamento de Engenharia Mecatrônica da Universidade de São Paulo).

O levantamento de requisitos para o projeto foi baseado na análise de duas câmaras comerciais e nas necessidades específicas do presente projeto. No item 3.2.2, no capítulo 3, são discutidos os requisitos de projeto, divididos em requisitos térmicos e requisitos funcionais.

1.2 Justificativa e relevância do trabalho

Os projetos mecânico-estruturais se baseiam nas propriedades mecânicas dos materiais para realizar o dimensionamento dos itens solicitados. Estas propriedades são estabelecidas com base nos ensaios mecânicos, em especial o ensaio de tração. Como as propriedades mecânicas são função da temperatura, deve-se realizar ensaios em diferentes temperaturas.

Nessas condições, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de uma câmara térmica. Desta forma, torna-se possível a determinação de propriedades mecânicas de materiais em diferentes temperaturas. Em particular, deseja-se determinar as propriedades do cobre eletrolítico em temperaturas acima da ambiente.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA ELEMENTAR

Neste capítulo, apresentar-se-á a revisão bibliográfica referente às propriedades mecânicas dos materiais metálicos e a influência da temperatura nas mesmas. Inicialmente, será abordada a questão das propriedades mecânicas. Feitas as considerações necessárias sobre as propriedades mecânicas, será apresentada a influência da temperatura nestas.

2.1 Propriedades mecânicas dos metais

As *propriedades mecânicas* de um material são aquelas características que determinam a resposta deste à estímulos mecânicos. De uma forma geral, estas propriedades são obtidas por intermédio de ensaios mecânicos. Neste texto, serão enfatizadas as propriedades associadas à resposta do material a tração, uma vez que o escopo do trabalho se restringe a este tipo de solicitação. São elas: *tensão de escoamento*, *limite de resistência mecânica*, *tensão de ruptura* e *alongamento*.

As propriedades apresentadas no parágrafo anterior são definidas com o auxílio da curva tensão-deformação, obtida através de um ensaio de tração. A figura 2.1 ilustra a curva em questão.

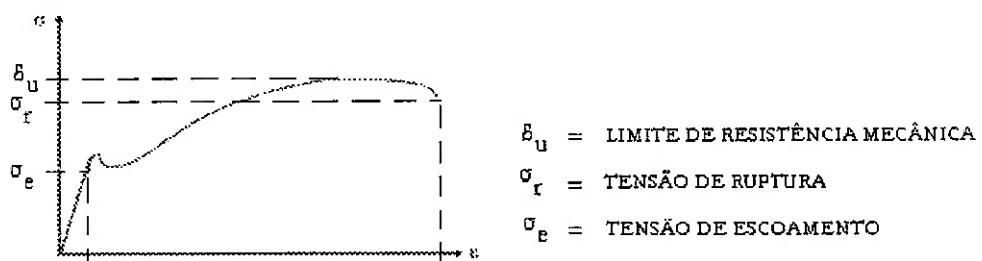


Figure 2.1 - Curva tensão-deformação de Engenharia

Deve-se observar que a curva representada pela figura 2.1 possui duas regiões distintas as quais estão associadas aos dois regimes diferentes de deformação do material: *elástico-linear* e *plástico*.

No regime elástico-linear, a relação entre tensão e deformação é linear e após a interrupção da solicitação de tração o material retorna ao estado indeformado. À medida que a tensão é incrementada, a deformação do material aumenta linearmente dentro da região elástica até que se inicie o processo de *deformação plástica*. A tensão que está no limiar entre esses dois regimes (elástico-linear e plástico) é dita *tensão de escoamento*, pois para tensões superiores a essa ocorre escoamento do material.

A relação entre tensão e deformação na região linear é ilustrada pela equação 2.1. A constante de proporcionalidade é uma propriedade dos materiais, geralmente dita *Módulo de Young (E)*.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

A figura 2.2 ilustra uma curva tensão-deformação obtida para pequenas deformações, i.e., dentro da zona elástica, com a finalidade de ilustrar o conceito de módulo de Young.

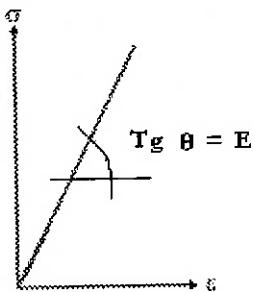


Figure 2.2 - Curva tensão-deformação para pequenos deslocamentos (Conceito de Módulo de Young)

Para tensões imediatamente superiores a tensão de escoamento, o material se encontra no regime plástico. Neste regime, o material sofre deformações permanentes, de tal forma que ele já não voltará a sua forma não-deformada após a interrupção da solicitação. Ao longo do processo de deformação plástica, o material é submetido ao fenômeno de *encruamento*. Este consiste no aumento gradual da resistência mecânica com os incrementos de deformação, i.e., o sólido se torna cada vez mais “duro” como consequência da deformação plástica.

Por fim, após a etapa de encruamento, se inicia o processo de ruptura ocasionado pela propagação de trincas em seu volume (a fratura também pode ocorrer por colapso plástico, em casos de materiais sem defeitos micro-estruturais).

A grandeza descrita pelo comprimento do intervalo de deformação, desde o inicio da solicitação até a ruptura, é dita *alongamento*.

Deve-se observar que as curvas tensão-deformação apresentadas são ditas curvas de Engenharia, uma vez que estas não consideram a redução da área do corpo de provas ao longo do processo de deformação. Entretanto, para

as análises desenvolvidas nesse texto, estas são suficientes. A figura 2.3 ilustra o conceito de curva tensão-deformação real.

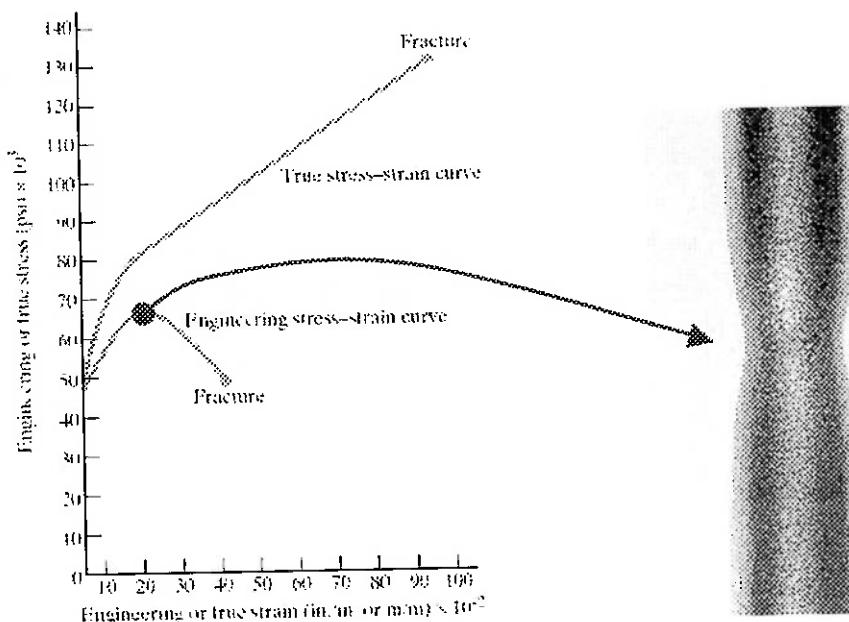


Figure 2.3 - Conceito de Curva Real e de Engenharia

A partir da observação da figura 2.3 pode-se observar que na situação real a tensão aumenta à medida que caminha para a ruptura do material. Este fato é consequência de a área da secção transversal do corpo de provas estar diminuindo gradativamente.

2.2 Deformação elástica em materiais metálicos

Como foi discutido na seção anterior, quando um material é solicitado dentro da região elástica ele se deforma proporcionalmente a tensão aplicada. Além disso, comentou-se que após a suspensão da solicitação o material volta a posição não-deformada. O mecanismo responsável por esse fenômeno é

bastante simples. Tensões inferiores à tensão de escoamento do material não são suficientes para romper ligações químicas. Conseqüentemente, as ligações são apenas deformadas, assim deslocando os átomos de sua posição inicial. Quando ocorre o encerramento da solicitação, os átomos voltam para a sua posição de equilíbrio restaurando a forma não deformada do sólido.

2.3 Deformação plástica em materiais metálicos

Considerando-se um sólido cristalino sem defeitos em sua microestrutura e calculando a tensão necessária para se deforma-lo plasticamente, obtém-se valores muito maiores do que os verificados experimentalmente. Este fato é atribuído a presença de defeitos em linha (discordâncias) no reticulado cristalino do material. O processo de deformação plástica é ocasionado pelo deslocamento de discordâncias no reticulado.

As discordâncias podem ser de dois tipos: *cunha* e *hélice*. A figura 2.4 (a) e (b) ilustram, respectivamente, os conceitos de *discordância em cunha* e *discordância em hélice*.

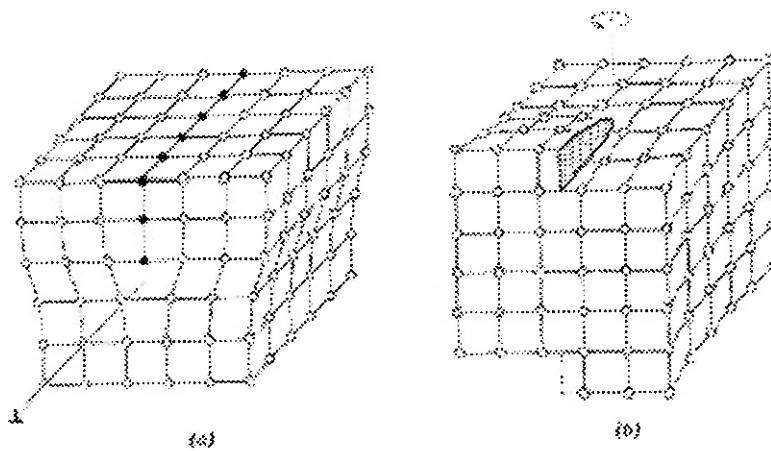


Figure 2.4 - Discordâncias em Cunha e Hélice

A partir da observação da figura 2.4 (a), verifica-se a existência de um plano atômico extra. Este tipo de defeito no reticulado cristalino é dito *discordância em cunha*. Por outro lado, os defeitos similares ao descrito na figura 2.4 (b) são ditos *discordâncias em hélice*.

A figuras 2.5 representa o fenômeno de deslocamento de discordâncias em cunha resultando na deformação do sólido.

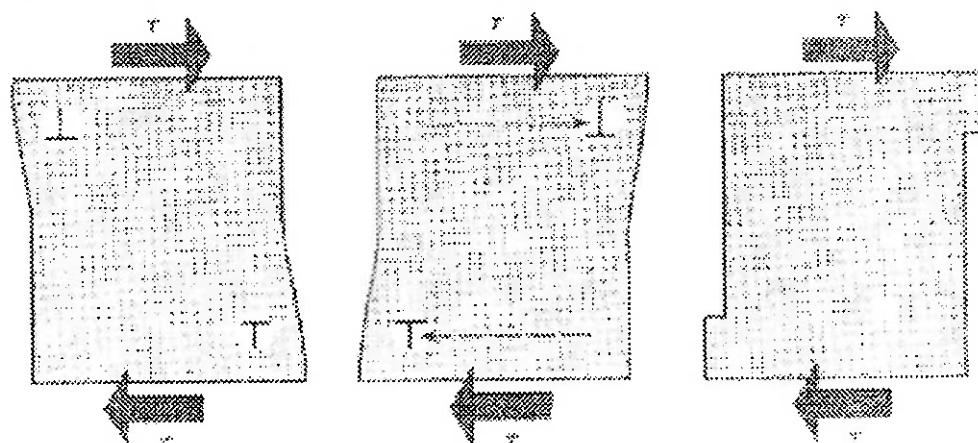


Figure 2.5 - Deslocamento de Discordâncias em Cunha

A figura 2.6 apresenta o deslocamento de discordâncias em hélice.

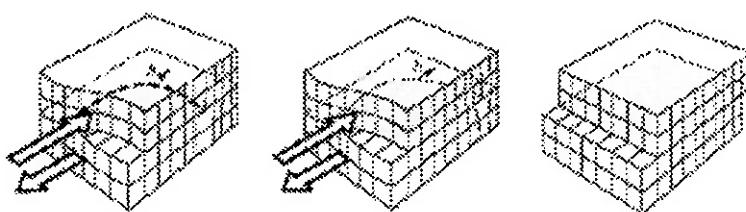


Figure 2.6 - Deslocamento de Discordâncias em Hélice

Deve-se observar a formação de um degrau no final do processo de deslocamento. Este é resultado da existência de um plano extra na estrutura. O efeito combinado de varias discordâncias deslocadas no reticulado possibilita a deformação plástica do ponto de vista macroscópico.

2.4 Influência da temperatura nas propriedades mecânicas dos metais

A temperatura pode influir, essencialmente, de duas formas distintas nas propriedades mecânicas dos metais. A primeira forma está associada ao amolecimento (redução da resistência mecânica) do material com a elevação da temperatura. A segunda forma está associada ao efeito contrário, o endurecimento em temperaturas elevadas. Na maior parte dos materiais metálicos, o amolecimento em altas temperaturas é mais pronunciado do que o endurecimento. Entretanto, deve-se ter em mente que, em altas temperaturas, os dois fenômenos podem coexistir. Neste capítulo, detalhar-se-á os mecanismos de amolecimento em alta temperatura e comentar-se-á brevemente os de endurecimento, por se tratar de uma exceção.

A elevação da temperatura ocasiona a intensificação dos processos de difusão em estado sólido. Estes permitem que ocorra o rearranjo dos átomos no reticulado cristalino, assim causando a eliminação de defeitos, i.e., revertendo o processo de *encruamento*. Nessas condições, o aumento de temperatura está associado ao amolecimento do material metálico cristalino. A esse processo de rearranjo, o qual ocorre no interior dos grãos, se dá o nome de *Recuperação*.

Por um outro lado, a elevação do coeficiente de difusão, como consequência do aumento da temperatura, intensifica os processos de difusão associados aos contornos de grãos. A maior mobilidade atômica nos contornos de grãos permite a nucleação e crescimento de novo grão, assim aliviando tensões residuais nessas regiões. Conseqüentemente, ocorre o amolecimento

da estrutura. A esse fenômeno de rearranjo, ocasionado pelo aumento da temperatura e associado aos contornos de grãos, se dá o nome de *Recristalização*.

A figura 2.7 ilustra a influência da temperatura na curva tensão-deformação de um aço.

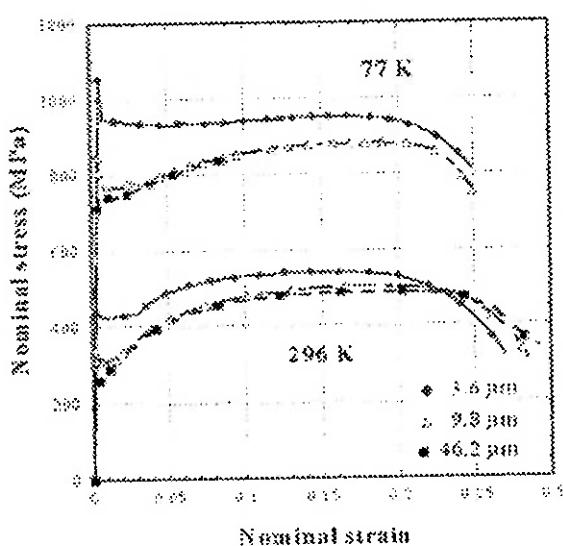


Figura 2.7 - Curva Tensão-Deformação de um aço a diferentes temperaturas.

Pode-se observar que, conforme a temperatura aumenta, a tensão de escoamento, o limite de resistência mecânica e a tensão de ruptura diminuem. Em outras palavras, a resistência mecânica do metal se torna menor. Este evento é atribuído aos fenômenos de alta temperatura descritos anteriormente: *Recuperação* e *Recristalização*. Deve-se observar, adicionalmente, que o alongamento aumenta com o aumento da temperatura. Esse fato já era esperado, uma vez que o aumento da temperatura reduz a resistência do material ao escoamento.

Os fenômenos micro-estruturais os quais foram descritos nesta seção implicam no amolecimento do material metálico em altas temperaturas. Esse amolecimento pode ocasionar o escoamento do material para tensões bem

menores do que a tensão de escoamento avaliada em temperatura ambiente. A esse fenômeno de escoamento em alta temperatura para tensões bem abaixo da de escoamento se da o nome de *Fluênci*a.

Verifica-se que em temperaturas não muito elevadas (100°C a 300°C) há um endurecimento de alguns materiais como consequência do fenômeno de *fragilização ao revenido*. Este consiste no encruamento acelerado como resultado da presença de impurezas e átomos de soluto na estrutura (SOUZA, 2004). Conforme mencionado anteriormente, este fenômeno não será tratado em detalhes por ser uma exceção a regra.

CAPÍTULO 3

PROJETO DA CÂMARA

Neste capítulo, são feitos comentários referentes aos aspectos organizacionais adotados para o desenvolvimento do projeto. Além disso, as atividades desenvolvidas são detalhadas.

3.1 Etapas de projeto

Com o objetivo de facilitar o gerenciamento do projeto, o trabalho apresentado neste texto se dividiu em etapas. São elas:

- Pesquisa e Análise Bibliográfica
- Levantamento de Requisitos
- Projeto Térmico
- Projeto Funcional
- Fabricação da Câmara
- Montagem do Conjunto
- Instrumentação e Aferição do Controle de Temperatura
- Especificação dos Ensaios Mecânicos
- Fabricação dos Corpos de Prova de Cobre
- Ensaios com o Cobre
- Análise dos Resultados dos Ensaios

3.2 Pesquisa e análise bibliográfica

O desenvolvimento da câmara térmica demanda análises as quais dizem respeito ao comportamento dos materiais do ponto de vista mecânico, quando submetidos a temperaturas elevadas. Desta forma, foram realizadas pesquisas e análises bibliográficas a fim de possibilitar a familiarização com os efeitos da

temperatura nas propriedades mecânicas dos materiais. As informações obtidas foram adaptadas ao contexto do trabalho e dispostas no capítulo II deste texto.

3.3 Levantamento de Requisitos

A definição dos requisitos de projeto foi fundamentada na análise de câmaras térmicas existentes no mercado, nas necessidades especiais associadas à máquina de ensaios do PMR e no contexto do projeto (objetivos).

Com a finalidade de organizar a atividade de levantamento de requisitos, esses são divididos em dois grupos:

- Requisitos Térmicos
- Requisitos Funcionais

Em um primeiro momento, a listagem dos requisitos de projeto pode parecer uma tarefa óbvia. Entretanto, esta atividade auxilia na compreensão e delimitação do problema. Nestas condições, serão listados os requisitos na seqüência do texto.

a) Requisitos Térmicos

- Necessidade de um bom sistema de isolamento, a fim de se minimizar as perdas de energia e, consequentemente, reduzir a potência demandada para o aquecimento.
- Aquecedor adequadamente dimensionado
- Ideal que a câmara tenha o menor volume interno possível. Desta forma, será reduzida a inércia térmica da mesma e, consequentemente, a potência de aquecimento demandada.
- Deve-se definir uma faixa de temperatura de interesse para a operação da câmara.
- A câmara deve ser constituída de materiais resistentes a temperatura

A estrutura da câmara deverá ser constituída de materiais resistentes a temperatura. Desta forma, será utilizado o aço inox, o qual resiste inclusive a oxidação em altas temperaturas.

O projeto em questão objetiva o desenvolvimento de uma câmara térmica para fins acadêmicos. Desta forma, torna-se necessário operar em uma faixa de temperaturas tal que seja possível observar os fenômenos de alta temperatura citados no capítulo II deste texto.

A temperatura de fusão do cobre é 1083°C e a do alumínio 625°C. Para fins de dimensionamento, será considerada a temperatura de 600°C. Desta forma, será possível observar os fenômenos de alta temperatura tanto do cobre como do alumínio, sem que haja a fusão do corpo de provas de alumínio em caso de falha do sistema de controle de temperatura.

b) Requisitos Funcionais

- A câmara deve permitir a visualização do corpo de provas durante o ensaio, uma vez que o foco do desenvolvimento é científico e acadêmico.
- A câmara deve ser acoplada a máquina de ensaios e removida com relativa facilidade, pois esta será manuseada por terceiros.
- Deve-se prever facilidade de fabricação

3.4 Projeto da Câmara

3.4.1) Projeto Térmico

Existem duas atividades básicas necessárias para a especificação de um sistema de aquecimento: *O dimensionamento da potência de aquecimento demandada e a análise do elemento resistivo.*

a) Dimensionamento da Potência de Aquecimento Demandada

Com o objetivo de se determinar a potência de aquecimento, a análise desenvolvida neste tópico é baseada em balanços de energia na câmara térmica e condições de contorno de convecção no âmbito da transferência de "calor". A potência de aquecimento será, a priori, aquela que provê uma temperatura interna de 600° C no interior da câmara, já que este é o objetivo de desempenho. Após a determinação dessa potência, a mesma será multiplicada por um fator dinâmico a fim de reduzir o tempo de resposta do sistema.

A equação 3.1 ilustra o balanço de energia na câmara térmica a qual é definida como um volume de controle para fins de análise.

$$P_E + P_G - P_S = P_{AC} \quad (3.1)$$

onde,

P_E = Potência que entra no volume de controle

P_S = Potência que sai do volume de controle

P_G = Potência gerada no volume de controle

P_{AC} = Potência acumulada no volume de controle

Em regime permanente, pode-se considerar que não há acumulo de potência no volume de controle. Desta forma, P_{AC} é igual a zero. Além disso, a potência que entra no volume de controle é nula uma vez que consideramos os efeitos líquidos de transferência de energia. Conseqüentemente, resulta que:

$$P_S = P_G \quad (3.2)$$

A potência que deixa o volume de controle é dissipada através do fenômeno de transferência de energia por convecção. A equação que descreve esse processo é dita *Lei do Resfriamento de Newton*. A equação 3.3 apresenta a lei em questão.

$$P = h \cdot A \cdot (T_{SUP} - T_{\infty}) \quad (3.3)$$

onde,

h = Coeficiente de convecção

A = Área superficial do volume (interface de transferência)

T_{SUP} = Temperatura do exterior do volume (superfície)

T_{∞} = Temperatura ao longe do ambiente

A substituição da equação 3.3 na equação 3.2 resulta na equação 3.4.

$$P_G = h \cdot A \cdot (T_{SUP} - T_{\infty}) \quad (3.4)$$

Para o caso em análise, a câmara térmica em regime permanente, a área superficial é a própria área da superfície da câmara. O valor da área superficial da câmara pode ser extraído da figura 3.7. Além disso, a temperatura ambiente, T_{∞} , é estimada como sendo aproximadamente 25º C. Portanto:

$$P_G = 0,00264 \cdot h \cdot (T_{SUP} - 25) \quad (3.5)$$

Com relação à temperatura da superfície, deve-se considerar o circuito térmico ilustrado na figura 3.1.

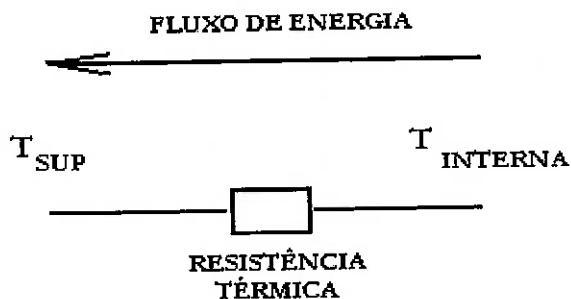


Figure 3.1 - Circuito Térmico

A temperatura na superfície será igual ao valor da temperatura interna (mais elevada) decrescida de uma queda devida à resistência térmica. Em outras palavras, a temperatura externa será um pouco menor do que a interna. Desta forma, aproximaremos a temperatura na superfície pela interna (600º C), uma vez que essa seria uma medida simplificadora e “conservativa”. Observe que ao fazer essa simplificação obter-se-á uma potência de aquecimento maior

do que a necessária para se atingir os objetivos de desempenho da câmara, por isso a hipótese é dita conservativa.

Portanto:

$$P = 0,00264 \cdot h \cdot (600 - 25) = 1,38 \cdot h \quad (3.6)$$

A estimativa do coeficiente de convecção depende, dentre outros fatores, da geometria do sistema. Na literatura, encontram-se valores, na sua maioria experimentais, obtidos para geometrias simples. Desta forma, tornar-se-ia necessário realizar ensaios de bancada para se determinar este coeficiente, tarefa a qual foge do escopo do trabalho apresentado neste texto.

Segundo INCROPERA, [1], os valores de coeficientes de transferência de energia por convecção natural (conforme o caso analisado) não ultrapassam $100 \text{ W/m}^2\text{K}$. Desta forma, como medida conservativa de simplificação adotar-se-á doravante $h=100 \text{ W/m}^2\text{K}$

Resulta que:

$$P = 138 \text{ W} \quad (3.7)$$

Conforme demonstrado, a potência de 138 watts é suficiente para se aquecer o interior da câmara até a temperatura de 600°C . Entretanto, deve-se considerar o fato de essa temperatura ser atingida em regime permanente, i.e., após um tempo suficientemente grande. Com a finalidade de se reduzir a inércia térmica do sistema (tempo de resposta), será utilizada uma potência de **500 watts**.

b) Dimensionamento do Elemento de Aquecimento

Devido a sua simplicidade e baixo custo, optou-se pelo elemento de *aquecimento resistivo*. Este deverá prover uma potência de 500 W, conforme visto no item anterior.

O dimensionamento do elemento resistivo será baseado no “*método da capacidade global*”, [1].

Como já existem materiais no mercado os quais, a princípio, poderiam ser utilizados para o propósito em questão (elemento de aquecimento), apenas será verificada a viabilidade de se utilizar um desses materiais. E, além disso, será calculado o comprimento do elemento resistivo necessário para o fornecimento de energia para a câmara.

Análise da viabilidade da utilização do elemento resistivo comercial

A análise será fundamentada no cálculo do tempo necessário para que o elemento atinja a sua temperatura de fusão. Será mostrado que este tempo tende a infinito, i.e., o elemento não atinge essa temperatura, logo é adequado para a aplicação.

Considere a relação 3.8.

$$Bi = \frac{h \cdot l}{k} \quad (3.8)$$

Onde,

Bi = Número de Biot (Adimensional)

K = Condutividade Térmica do material

l = comprimento característico do elemento resistivo

Segundo o método da capacidade global, caso Bi seja menor do que 0,1, pode-se desprezar os efeitos espaciais de distribuição de temperatura no interior do sólido (elemento resistivo) o qual troca energia com um ambiente. Desta forma, a temperatura em todos os pontos do interior deste são aproximadamente iguais.

A expressão 3.9 ilustra o cálculo de Bi para o elemento resistivo descrito na tabela 3.2, operando no interior da câmara térmica. O elemento resistivo descrito pela tabela é um material disponível no mercado, o qual se deseja verificar a possibilidade de uso.

PROPRIEDADES DO ELEMENTO RESISTIVO	
PROPRIEDADE	VALOR
Ponto de Fusão	1450º C
Raio (r)	5 mm
Condutividade Térmica (k)	50 W/m.K
Resistividade Elétrica	0,00215 Ω/m
Calor Específico	5000 J/Kg
Densidade	9000 Kg/m ³

Tabela 3.2 - Propriedades do elemento resistivo de aquecimento

$$Bi = \frac{100 \cdot 0,0025}{50} = 0,05 \quad (3.9)$$

Observe que novamente considera-se o pior caso, i.e., $h=100 \text{ W/m}^2.\text{K}$.

Como $Bi < 0,1$, desprezar-se-á os efeitos espaciais de distribuição de temperatura no interior do elemento resistivo e, consequentemente, serão considerados apenas os aspectos temporais. Nessas condições, o balanço de energia, representado pela equação 3.1, aplicado ao elemento resistivo resulta na expressão 3.10.

$$P_G - P_s = P_{AC} \quad (3.10)$$

$$\frac{V^2}{\rho \cdot l} = 2\pi r l \cdot h \cdot (T - T_a) + \pi \cdot r^2 \cdot l \cdot \rho_e \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$2\pi r h T_a + V^2 \cdot \frac{\pi r^2}{\rho l^2} = \pi r^2 \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + 2\pi r h T$$

Onde,

ρ_e = Resistividade elétrica do material

T = Temperatura do elemento resistivo

T_a = Temperatura do ambiente interno da câmara

r = Raio do elemento resistivo

V = Tensão elétrica a qual o elemento está submetido

t = Tempo

C_p = Calor Específico do elemento resistivo

ρ = Densidade do elemento resistivo

Resolvendo a equação diferencial descrita pela relação 3.9, obter-se-á a temperatura no elemento resistivo em função dos parâmetros apresentados.

Desta forma, pode-se obter o tempo, t , necessário para que a temperatura do elemento atinja seu ponto de fusão. Resulta que t tende a infinito.

Como o elemento resistivo necessitaria de um tempo demasiadamente grande para atingir seu ponto de fusão, conclui-se, imediatamente, que este é adequado para a aplicação.

Cálculo do comprimento do elemento resistivo

O cálculo do comprimento do elemento é baseado na potência demandada para este.

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{V^2}{\rho_e \cdot \frac{l}{A_{sr}}} \Rightarrow l = \frac{V^2 \cdot A_{sr}}{P \cdot \rho_e} \quad (3.10)$$

Onde,

A_{sr} = Área da secção reta do elemento

A tensão de operação do equipamento será de 110 V, devido à disponibilidade desta nas instalações do laboratório do PMR. Desta forma, resulta que:

$$l=0,88 \text{ m}$$

3.4.2 Projeto Funcional

Como a câmara deverá ser projetada para operar em conjunto com a máquina de ensaios de tração do PMR, deve-se considerar esta ultima, a priori. A máquina de ensaios é apresentada pela figura 3.2.

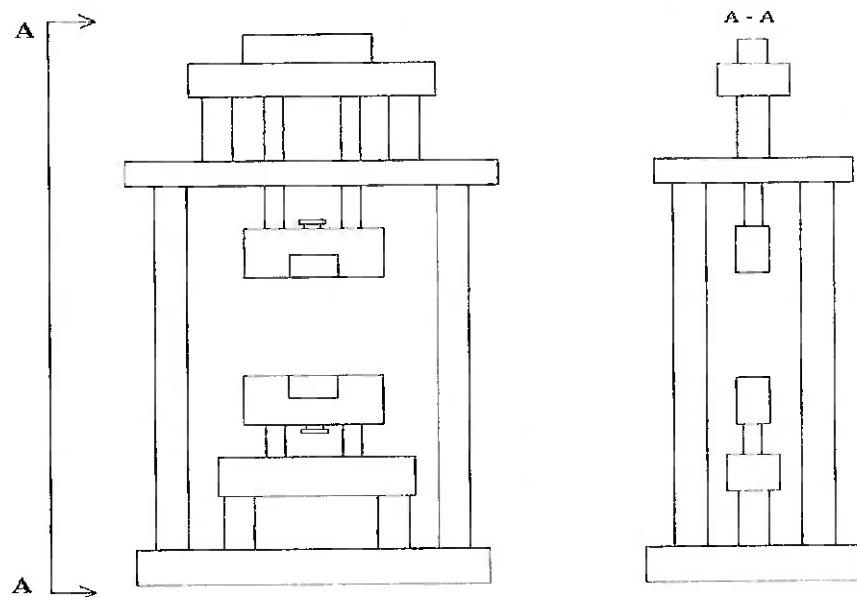


Figure 3.2 - Máquina do PMR

Através da análise dos requisitos funcionais, descritos no item 3.3, e das facilidades construtivas, elaborou-se a estrutura apresentada nas figuras 3.3, 3.4 e 3.5. Deve-se ressaltar que a definição das características geométricas da câmara está intimamente associada à facilidade construtiva da mesma. Essa preocupação com a fabricação decorre do fato de a câmara ser demasiadamente compacta, quando comparada com câmaras comerciais.

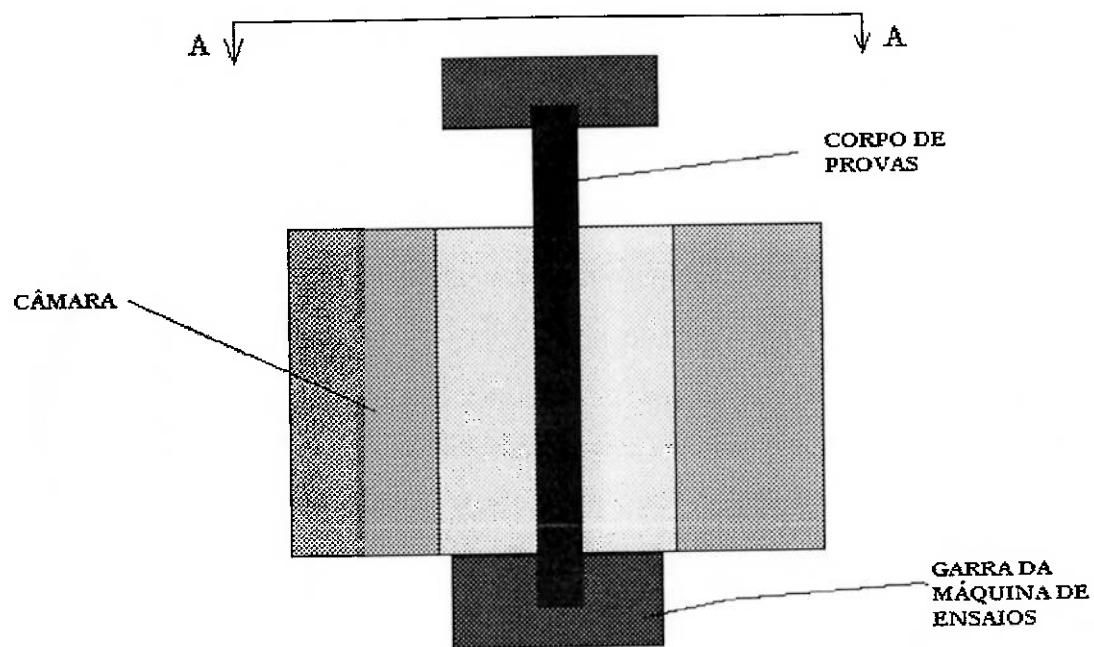


Figure 3.3 – Vista Frontal da Câmara

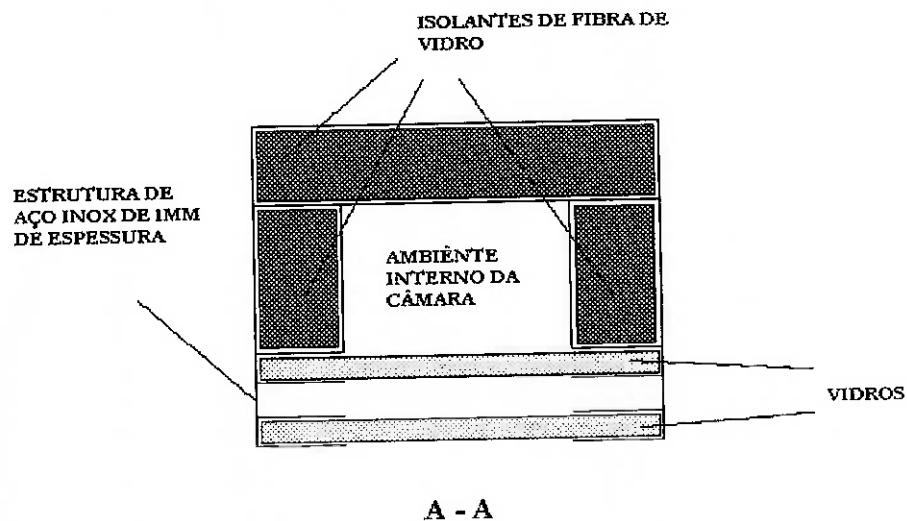


Figure 3.4 - Corte A-A da câmara

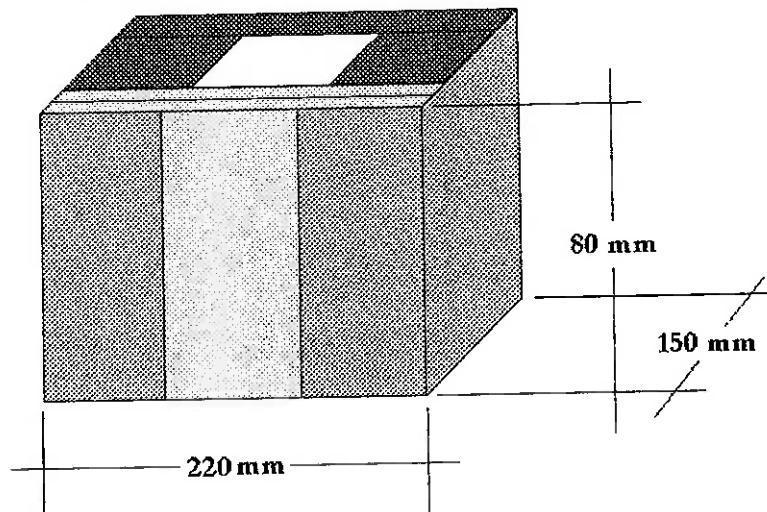


Figure 3.5 – Projeção Obliqua da Câmara

A partir da observação das figuras 3.3, 3.3 e 3.5, pode-se verificar que o isolamento das laterais e do fundo da câmara será feito com fibra de vidro. A parte da frente desta permitirá a visualização do ensaio, uma vez que é constituída de duas placas de vidro. Os isolamentos superior e inferior serão implementados com placas de madeira.

A figura 3.6 ilustra o conjunto máquina de ensaios e câmara.

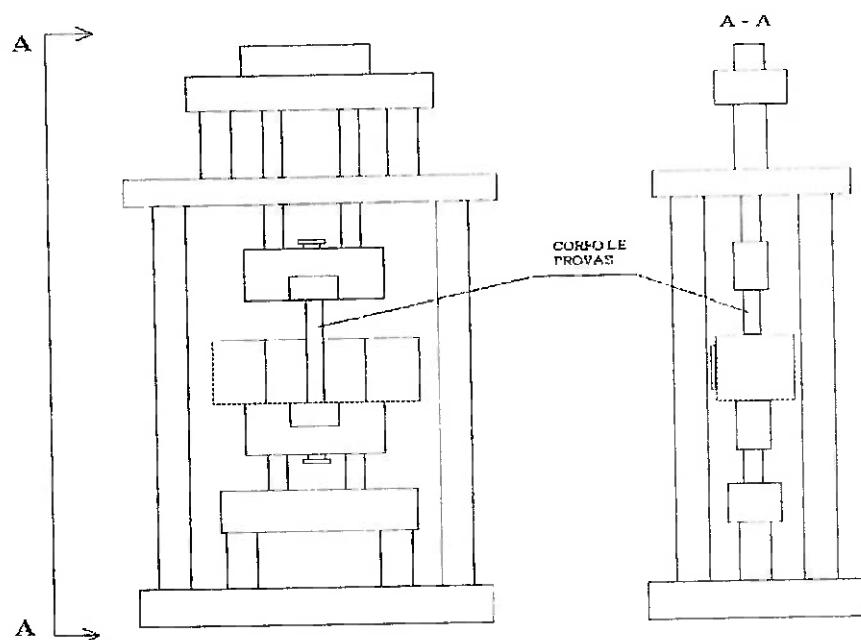


Figure 3.6 - Ilustração do conjunto

CAPÍTULO IV

FABRICAÇÃO, MONTAGEM E INSTRUMENTAÇÃO DO EQUIPAMENTO

4.1 Fabricação e montagem da câmara

Conforme mencionado em 3.3, a estrutura da câmara deverá ser confeccionada em aço inox. Portanto, toda a estrutura foi fabricada em chapas de inox de 1 mm de espessura, dobradas e cortadas. A figura 4.1 ilustra o desenho de conjunto da estrutura da câmara.

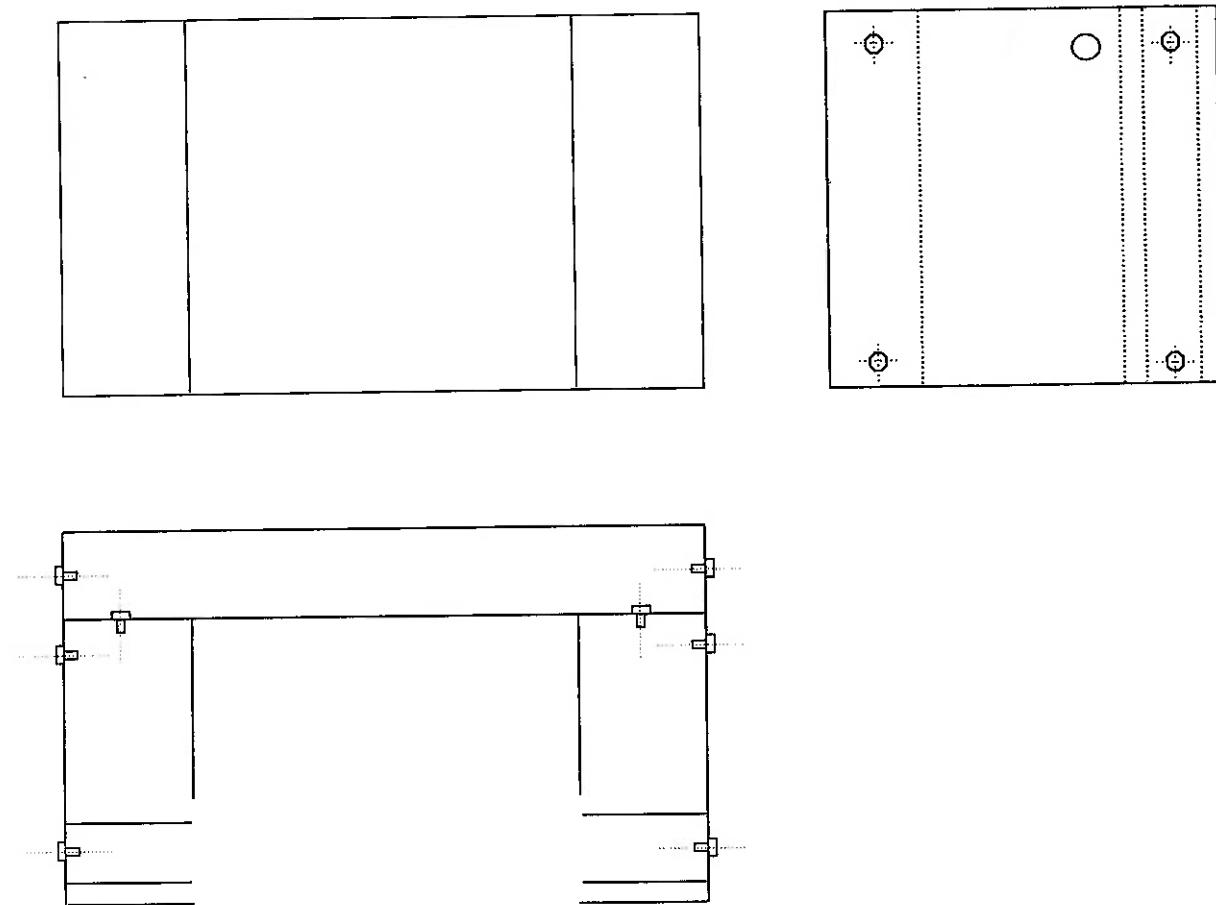


Figura 4.1 – Desenho de conjunto da estrutura da câmara

O esquema de montagem é apresentado na figura 4.2

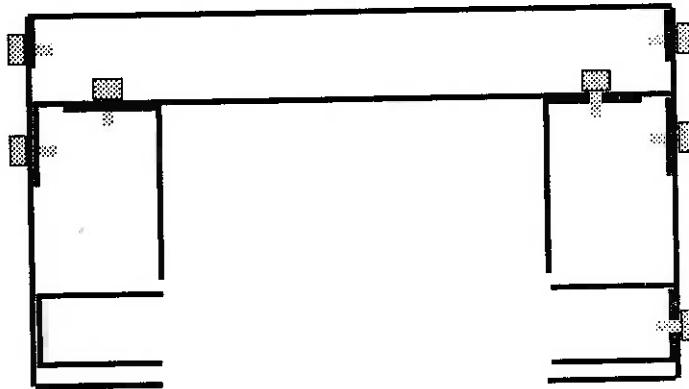


Figura 4.2 – Esquema de montagem

Conforme mencionado em itens anteriores, o projeto da câmara foi orientado à fabricação. Isto é, durante o projeto as definições referentes à estrutura foram feitas de forma a simplificar a fabricação desta. Conseqüentemente, não há muitas considerações a se fazer sobre a fabricação (felizmente).

4.2 Instrumentação da câmara

O presente trabalho de formatura objetiva desenvolver uma câmara térmica que seja capaz de manter a temperatura de seu interior perto de um valor de referência previamente definido. Desta forma, identifica-se a necessidade de um sistema de controle, uma vez que a temperatura no interior da câmara deve ser controlada.

A estratégia de controle utilizada é dita *controle on-off*. A figura 4.3 ilustra a atuação deste no controle da temperatura no interior da câmara.

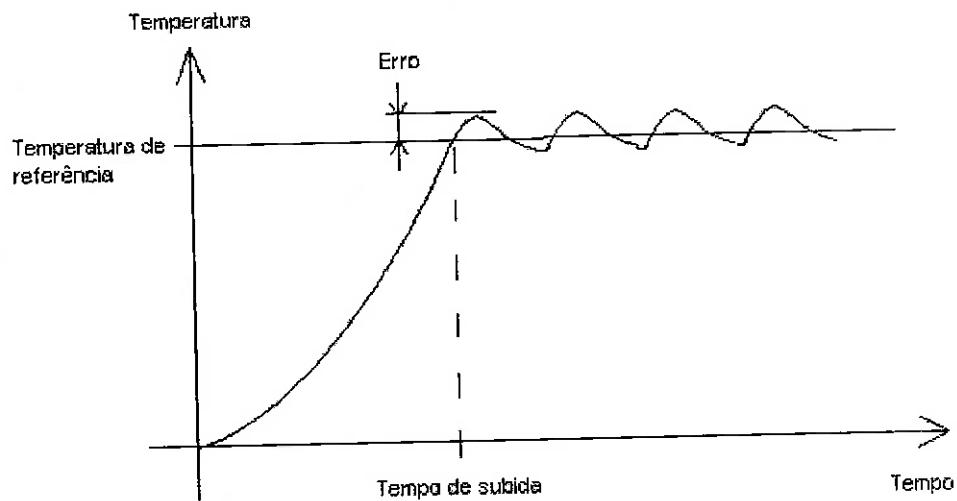


Figura 4.3 – Ação de controle on-off

A implementação deste sistema de controle será baseada no uso de um termostato de bulbo capilar, modelo RAINBOW 320 R. Este equipamento se comporta como um aberto no circuito quando a temperatura em seu bulbo (sensor) ultrapassa um certo valor de referência ajustado (temperatura desejada). A figura 4.4 ilustra o termostato RAINBOW 320 R.

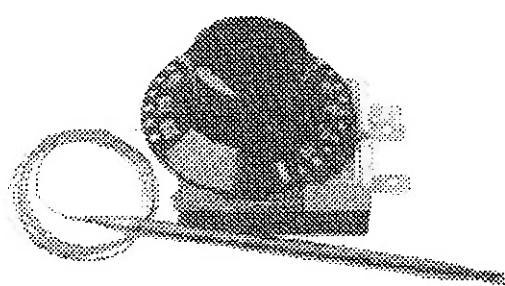


Figura 4.4 – Termostato RAINBOW 320 R.

A figura 4.5 apresenta o esquema de montagem do sistema de controle.

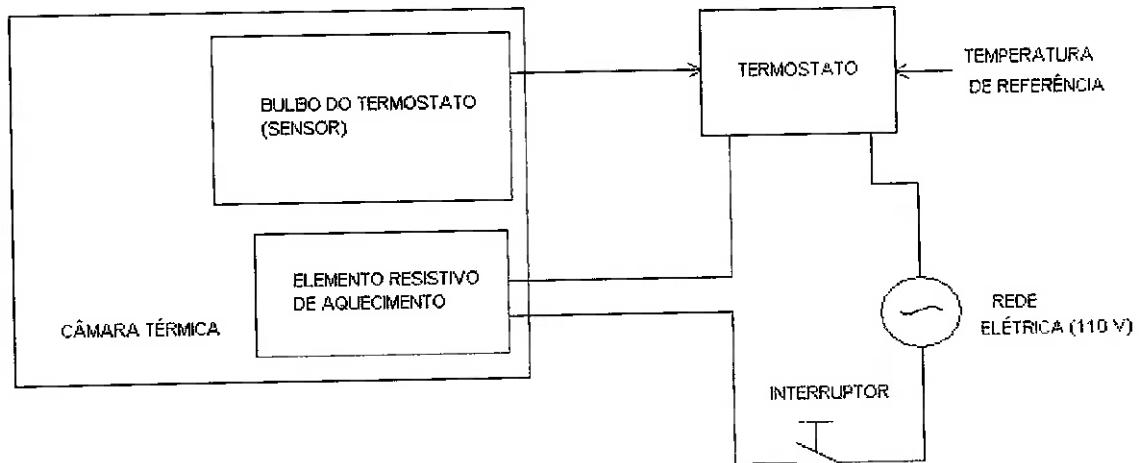


Figura 4.5 – Esquema de montagem do sistema de controle

A partir da observação da figura 4.5, verifica-se que quando a temperatura no interior da câmara atinge um valor superior ao ajustado no termostato este interrompe a circulação de corrente no circuito principal.

CAPÍTULO V

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO COBRE ELETROLÍTICO

Conforme mencionado anteriormente, o desenvolvimento da câmara térmica é motivado pela necessidade de se determinar propriedades mecânicas de materiais em diferentes temperaturas. Desta forma, utilizou-se a câmara desenvolvida para realizar ensaios de tração do cobre eletrolítico em diversas temperaturas. Os resultados dos ensaios são apresentados nesse capítulo, bem como a interpretação fenomenológica dos mesmos.

5.1 Especificação dos ensaios

Devido a restrições dimensionais da câmara térmica e da máquina de ensaios, foram utilizados corpos de prova não padronizados nos ensaios de tração. Isto é, os corpos de prova não atendem as especificações estabelecidas pela norma ASTM E21. Entretanto, constatou-se que os resultados obtidos nos ensaios com corpos padronizados e não-padronizados são similares. A figura 6.1 ilustra a geometria do corpo de prova utilizado nos ensaios.

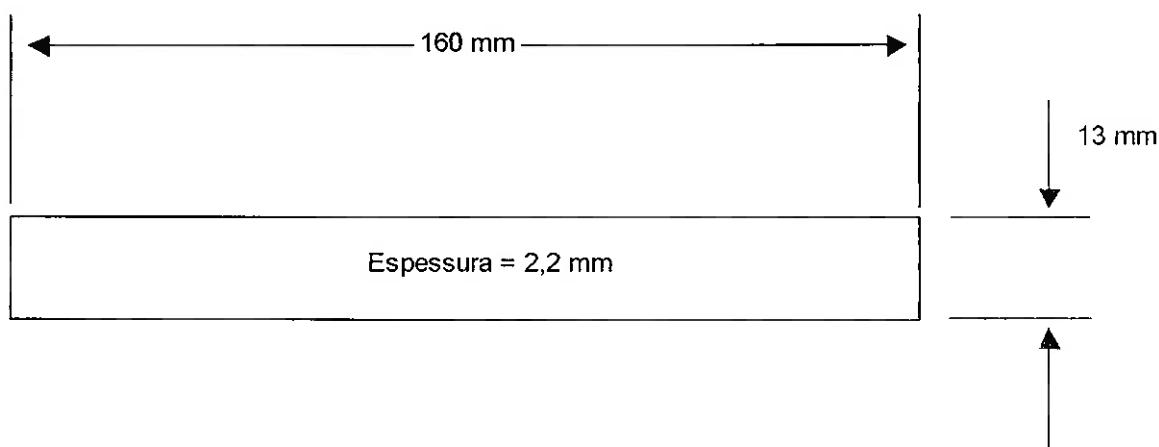


Figura 5.1 - Geometria dos corpos de prova de cobre eletrolítico

A metodologia adotada na realização dos ensaios em temperatura controlada consiste em:

1. Acoplar a câmara térmica à máquina de ensaios de tração
2. Prender o corpo de provas nas garras da máquina
3. Selecionar a temperatura desejada para o ensaio no módulo de controle da câmara
4. Ligar a câmara
5. Esperar até que o sistema de controle identifique que a temperatura no interior da câmara atingiu o valor selecionado
6. Aguardar 5 minutos para que seja atingida uma condição térmica próxima do regime permanente
7. Realizar o ensaio (propriamente dito)

5.2 Considerações adicionais sobre os ensaios

Foram realizados ensaios de tração a 20, 100, 150, 200, 250, 300 e 320°C. Para cada temperatura, foram realizados dois ensaios, de tal forma que as propriedades obtidas para cada temperatura foram resultado da média dos dois ensaios realizados.

Deve-se observar que a determinação de propriedades mecânicas de um material não é um processo determinístico, i.e., deve-se considerar a aleatoriedade envolvida. Esta aleatoriedade está associada a dois fatos:

- Cada corpo de prova possui características distintas por terem sido fabricados de forma individual. Conseqüentemente, as propriedades mecânicas dos corpos de prova são distintas, apesar de estes serem constituídos do mesmo material.

- Cada ensaio de tração sofre a influência de fatores externos aleatórios. Desta forma, cada ensaio é único.

O primeiro fator mencionado diz respeito à aleatoriedade na fabricação do corpo de provas. Esta aleatoriedade se manifesta por meio da variação no número de defeitos na estrutura de cada corpo de provas que são resultado do processo de fabricação do mesmo. Quanto maior o número de defeitos na estrutura, menos resistente tende a ser o corpo de provas. O outro fator está associado à aleatoriedade inherente ao ensaio. Durante a execução do ensaio diversos fatores podem variar, assim influenciando o resultado final.

Em vista desses fatos, conclui-se que a determinação das propriedades mecânicas deve ser fundamentada em um estudo estatístico. Entretanto, como a análise estatística foge do escopo do presente trabalho, este desconsidera a necessidade desse estudo (dando ênfase na discussão qualitativa dos resultados).

5.3 Resultados experimentais

A tabela 5.1 apresenta os valores das propriedades mecânicas do cobre eletrolítico para as temperaturas nas quais este foi ensaiado.

PROPRIEDADES MECÂNICAS DO COBRE ELETROLÍTICO				
Temperatura (°C)	Se (MPa)	Su (MPa)	Alongamento (%)	E (GPa)
20	69	243	59	115
100	55	195	61	115
150	52	186	64	114
200	48	173	67	113
250	43	154	69	113
300	40	140	70	112
320	38	133	71	112

Tabela 5.1 - Propriedades mecânicas do cobre eletrolítico

As figuras 5.2 a 5.5 ilustram os dados apresentados pela tabela 5.1.

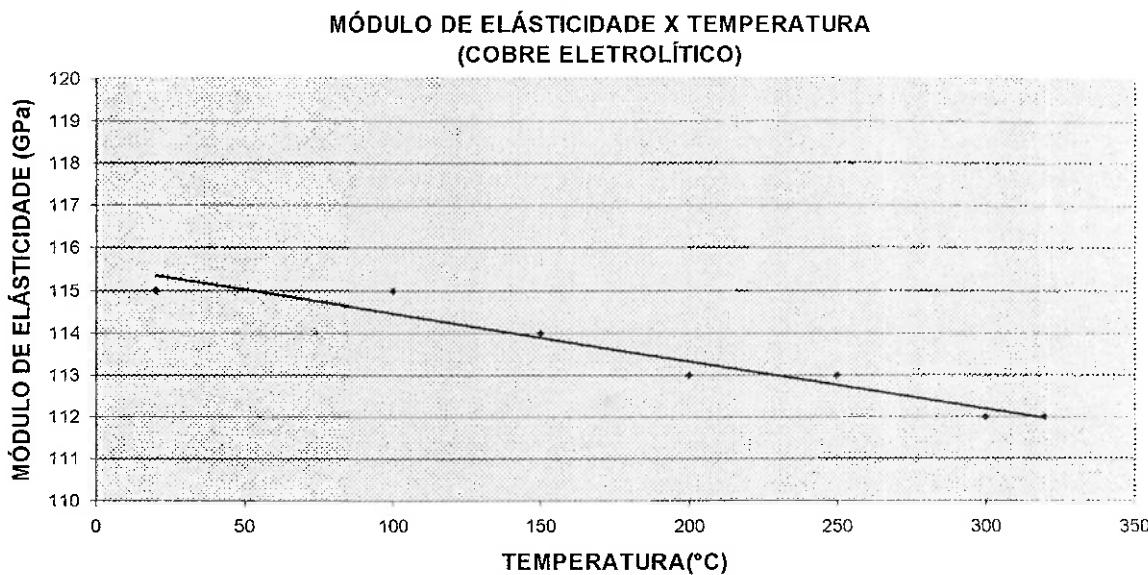


Figura 5.2 - Módulo de elasticidade do cobre eletrolítico em função da temperatura

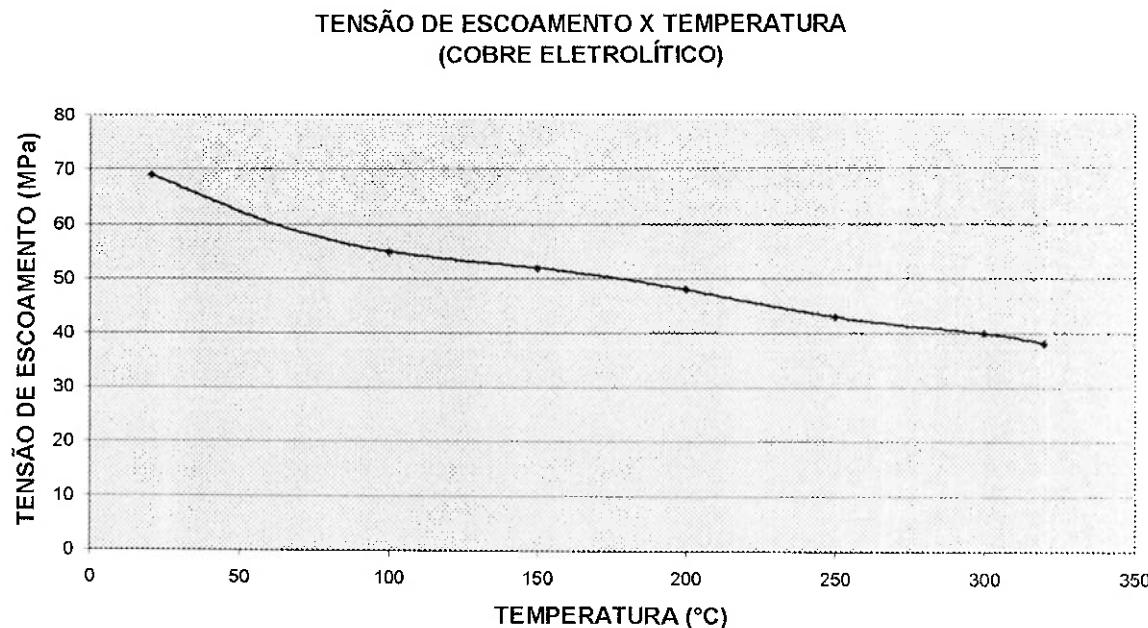


Figura 5.3 – Tensão de escoamento do cobre eletrolítico em função da temperatura

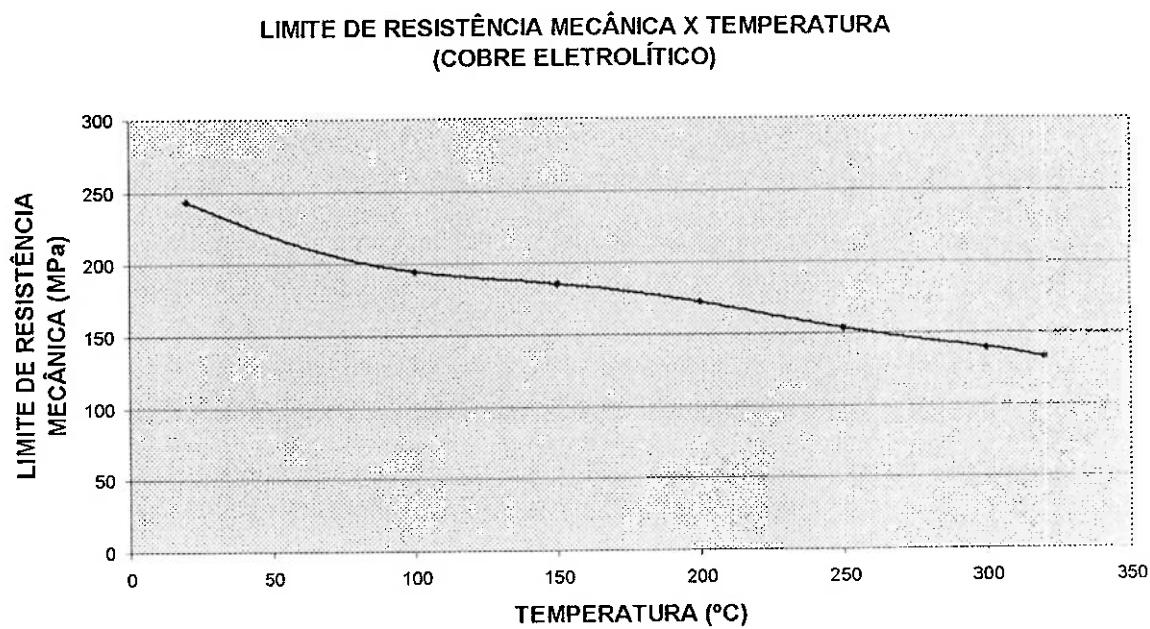


Figura 5.4 – Limite de resistência mecânica do cobre eletrolítico em função da temperatura

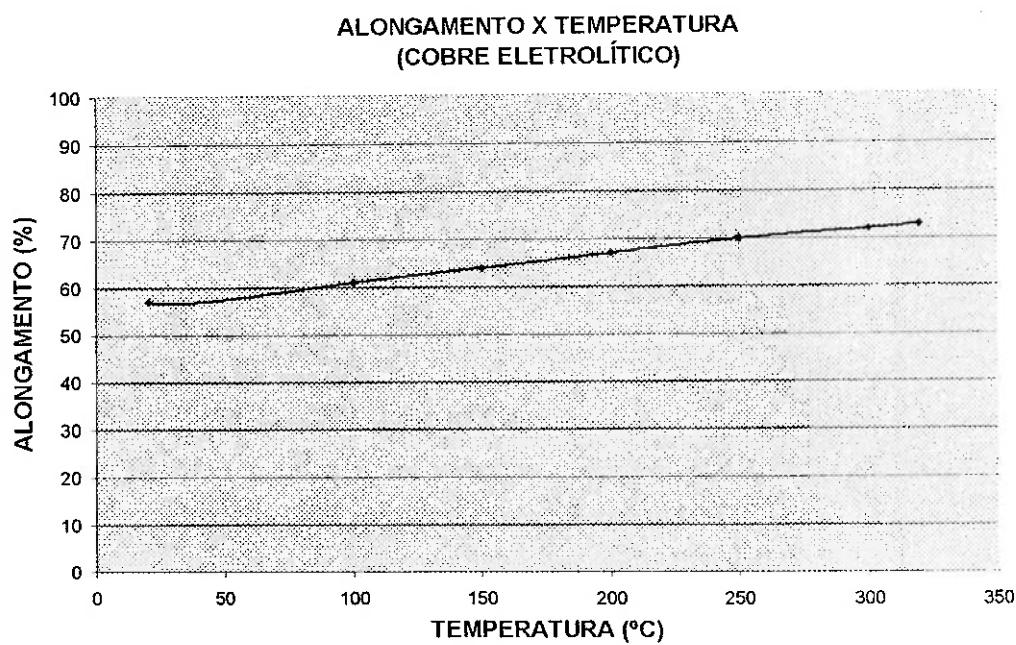


Figura 5.5 – Alongamento do cobre eletrolítico em função da temperatura

$$Su_{(T)} = 254,75 - 0,3373 \cdot T - 0,0173 \cdot T^2 + 0,0003 \cdot T^3 - 2 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 + 4 \cdot 10^{-9} \cdot T^5 - 4 \cdot 10^{-12} \cdot T^6 \quad (5.1)$$

$$Se_{(T)} = 72,098 - 0,0747 \cdot T - 0,0055 \cdot T^2 + 8 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 - 5 \cdot 10^{-7} \cdot T^4 + 1 \cdot 10^{-9} \cdot T^5 - 1 \cdot 10^{-12} \cdot T^6 \quad (5.2)$$

$$A_{(T)} = 59,442 - 0,2151 \cdot T + 0,0056 \cdot T^2 - 5 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 3 \cdot 10^{-7} \cdot T^4 - 6 \cdot 10^{-10} \cdot T^5 + 6 \cdot 10^{-13} \cdot T^6 \quad (5.3)$$

$$E_{(T)} = 115,59 - 0,0113 \cdot T \quad (5.4)$$

As equações 5.1 a 5.3 são resultado da interpolação polinomial dos pontos obtidos experimentalmente. A equação 5.4 é se refere à variação do módulo de elasticidade com a temperatura. Desta forma, a equação 6.4 é resultado da regressão linear dos valores obtidos para o módulo elástico, uma vez que a variação desta propriedade é muito pequena.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

Inicialmente ressalta-se que os objetivos do trabalho foram atingidos com resultados satisfatórios. Em outras palavras, a câmara térmica desenvolvida se mostrou adequada para viabilizar os objetivos propostos (realizar ensaios em diferentes temperaturas, acima da ambiente).

6.1 Considerações a cerca do desenvolvimento da câmara

Apesar de a câmara térmica desenvolvida atender aos propósitos estabelecidos, algumas dificuldades foram encontradas no seu desenvolvimento. Um aspecto que merece ser discutido é a dificuldade em se estabelecer um erro de temperatura. Sabe-se que, segundo o fabricante do sensor de bulbo, este responderia a variações de temperatura maiores que $0,1^{\circ}\text{C}$. Entretanto, não se pode dizer que este é o erro máximo na temperatura do ensaio, outros erros devem ser considerados:

- Erro devido à distribuição espacial de temperatura dentro da câmara

Este erro é consequência do fato de a temperatura medida pelo bulbo ser diferente da temperatura no corpo de provas, pois a temperatura no interior da câmara é não-uniforme.

- Erro visual no ajuste da temperatura no termostato

O ajuste de temperatura no termostato é analógico, desta forma, os erros visuais são inevitáveis no ajuste de temperatura.

Com relação aos erros visuais, pode-se dizer que estes são limitados por metade da menor divisão da escala, 5 °C. Porem, com relação ao erro de distribuição espacial nada pode ser afirmado sem uma análise minuciosa. Desta forma, surge a necessidade de se realizar uma análise em elementos finitos, a fim de se avaliar esse erro.

6.2 Considerações a cerca do comportamento mecânico do cobre eletrolítico em temperaturas acima da ambiente

Pode-se observar que os valores de tensão de escoamento (σ_e) e limite de resistência mecânica (S_u) sofrem grande redução percentual em seus valores com o aumento da temperatura. A redução é de cerca de 45% em ambos os casos, dentro da faixa de temperaturas considerada. Este fato já era esperado, pois o aumento da temperatura induz aos fenômenos de *recuperação* e *recristalização*, conforme mencionado no segundo capítulo deste texto.

Com relação ao módulo de elasticidade, este sofre pequena redução percentual em seu valor, podendo ser considerado constante na faixa de temperaturas considerada. A redução percentual do módulo de elasticidade é de cerca de 2%, quando a temperatura varia de 20 a 320°C.

Por outro lado, o aumento da temperatura ocasiona um incremento no alongamento de aproximadamente 28%, uma vez que a resistência ao escoamento é reduzida.

Com base nos resultados experimentais obtidos, são propostas relações funcionais entre as propriedades mecânicas avaliadas e a temperatura. Deve-se observar que essas relações são aproximadas, uma vez que não foi

realizado um estudo estatístico das propriedades mecânicas. As equações 5.1 a 5.4 ilustram as relações propostas.

6.3 Recomendações de trabalhos futuros

Devido às limitações impostas pelo sistema de controle analógico, recomenda-se o desenvolvimento de um sistema de controle digital para câmaras térmicas. Desta forma, será possível reduzir os erros de medição. Para tanto, recomenda-se a utilização de um sistema de sensoriamento baseado em termopares e um conversor digital-analógico.

Como consequência da aleatoriedade inerente ao processo de caracterização mecânica, recomenda-se também um estudo estatístico das propriedades mecânicas do cobre eletrolítico em temperaturas acima da ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DEWITT, David P.; INCROPERA, Frank P. “**FUNDAMENTOS DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E DE MASSA**”. Rio de Janeiro, LTC, 1998.
- [2] VAN VLACK, Lawrence H. “**PRINCÍPIOS DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DOS MATERIAIS**”. Rio de Janeiro, Campus, 1984.
- [3] FERRANTE, Maurizio. “**SELEÇÃO DE MATERIAIS**”. São Carlos, EduFSCar, 2002.
- [4] SOUZA, Sérgio A. “**ENSAIOS MECÂNICOS DE MATERIAIS METÁLICOS**”. São Paulo, Edgard Blucher, 2004.
- [5] TWEEDDALE, J.G.“**THE MECHANICAL PROPERTIES OF METALS**”. London , Allen and Unwin, 1964.
- [6] HORGER, O.J. “**METALS ENGINEERING DESIGN**”. New York, McGraw-Hill, 1953.
- [7] SOARES, P. “**AÇOS – CARACTERÍSTICAS, TRATAMENTOS**”. 3^aed, 1980.
- [8] AÇOS VILLARES S.A.. “**AÇOS INOXIDÁVEIS**”. São Paulo p.01.
- [9] AMERICAN SOCIETY OF METALS. ”**METALS HANDBOOK**”. 9^a ed, vol.1.
- [10] CALLISTER, William D.“**MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING**”. New York, Wiley, 2000.

[11] RUGGIERI, C.“**MODELAGEM MICROMECÂNICA DA FRATURA DÚCTIL E APLICAÇÕES A INTEGRIDADE ESTRUTURAL**”. 2001, Tese apresentada para obtenção do título de professor livre docente pela Universidade de São Paulo, São Paulo.

[12] SILVA, C.N.P.“**EFEITO DAS SEPARAÇÕES NA TENACIDADE DE UM AÇO MICROLIGADO PRODUZIDO POR LAMINAÇÃO CONTROLADA**”. 1986, Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre em engenharia pela Universidade de São Paulo, São Paulo.