

**ADRIANO ALVES CÂMARA MENDES**

**ESTUDO DO TRANSIENTE TÉRMICO ESTRUTURAL NO  
ISOLAMENTO DE JUNTA DE DUAS BARRAS ESTATÓRICAS  
DE UM HIDROGERADOR**

Estudo apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para a disciplina:  
PMC 581 - Trabalho de formatura

Área de Concentração:  
Engenharia Mecânica com ênfase  
em energia e fluidos

Orientador:  
Marcelo Augusto Leal Alves

São Paulo

1998

## **AGRADECIMENTOS**

Ao orientador Prof. Marcelo Augusto Leal Alves pelas diretrizes, apoio e disponibilidade.

Ao Prof. Dr. José Roberto Simões Moreira pela compreensão das minhas dificuldades.

## **SUMÁRIO**

### **Resumo**

|                                                                                                                                                                                                     |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b>                                                                                                                                                                                 | <b>1</b>  |
| <b>2 HIDROGERADOR - PARTES E FUNCIONAMENTO</b>                                                                                                                                                      | <b>2</b>  |
| <b>3 HISTÓRICO</b>                                                                                                                                                                                  | <b>8</b>  |
| <b>4 BENEFÍCIOS OBTIDOS COM ESSE TRABALHO</b>                                                                                                                                                       | <b>11</b> |
| <b>5 O TRANSIENTE TÉRMICO ESTRUTURAL</b>                                                                                                                                                            | <b>12</b> |
| <b>6 HIPÓTESES</b>                                                                                                                                                                                  | <b>14</b> |
| <b>7 SOLUÇÃO APRESENTADA</b>                                                                                                                                                                        | <b>20</b> |
| <b>8 ESTUDO DO SOFTWARE E MODELAGEM</b>                                                                                                                                                             | <b>21</b> |
| <b>9 PROPRIEDADES</b>                                                                                                                                                                               | <b>27</b> |
| <b>10 PROCESSAMENTO</b>                                                                                                                                                                             | <b>29</b> |
| <b>11 ENSAIOS</b>                                                                                                                                                                                   | <b>33</b> |
| <b>12 CONCLUSÃO</b>                                                                                                                                                                                 | <b>37</b> |
| <b>13 SUGESTÕES FUTURAS</b>                                                                                                                                                                         | <b>40</b> |
| <b>ANEXO A - RESULTADO DE ENSAIOS DE CICLOS<br/>TÉRMICOS COM CURVA DE AQUECIMENTO DE 23°C A 150°<br/>EM 180s. TESTA HIPÓTESE DE FADIGA</b>                                                          | <b>41</b> |
| <b>ANEXO B - RESULTADO DE ENSAIOS COM QUATRO<br/>DIFERENTES CURVAS DE AQUECIMENTO. TESTA HIPÓTESE<br/>DE PROPORCIONALIDADE DE CURVA DE AQUECIMENTO X<br/>TRINCAS E VISUALIZA SUAS LOCALIZAÇÕES.</b> | <b>48</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>                                                                                                                                                                   | <b>51</b> |
| <b>APÊNDICE I - ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DA MASSA<br/>EPOXI UTILIZADA NO ISOLAMENTO</b>                                                                                                                |           |
| <b>APÊNDICE II - CAPÍTULO I DO MANUAL DO CONTROLADOR</b>                                                                                                                                            |           |

## **RESUMO**

O trabalho trata de um estudo em elementos finitos do transiente térmico-estrutural em um isolamento de massa e resina epoxi que envolve uma conexão de cobre em um hidrogerador. O transiente é causado pelo aquecimento do cobre de 23°C a 150°C devido a passagem de corrente elétrica gerada no início de funcionamento do hidrogerador.

O estudo visa simular no ANSYS5.3 o aquecimento do cobre e seu isolamento de forma que possamos estabelecer uma relação entre a velocidade de aquecimento e as tensões resultantes a que o isolamento fica sujeito. O estudo foi motivado pelo aparecimento de trincas no isolamento.

A principal conclusão do trabalho é a de que as tensões são proporcionais a velocidade de aquecimento da máquina. Foram mostrados resultados de tensões para duas curvas de aquecimento: uma em 180s (com tensões resultantes de até 246,5 MPa) e a outra em 3600s (com tensões resultantes de até 95,5 MPa).

Testes experimentais feitos apoiam os resultados da simulação tanto na localização das trincas como na proporcionalidade velocidade de aquecimento x trincas. A tensão de escoamento da resina está na faixa de 85 a 90 MPa. Sendo assim os resultados para a curva de 3600s sugerem a não ocorrência de trincas o que também foi constatado experimentalmente.

## **1 INTRODUÇÃO**

Este trabalho de formatura trata de um estudo das tensões resultantes nos isolamentos de uma junção de duas barras estatóricas de cobre de um hidrogerador. Essas tensões são resultantes de um transiente térmico-estrutural que ocorre nos momentos iniciais do ligamento da máquina onde a corrente alternada presente nas barras em questão cresce de 0 a 4000 A , gerando o aquecimento do cobre de 23 a 150 °C em cerca de três minutos. Através do modelamento e análise executado com software de elementos finitos ANSYS 5.3 pretendemos estudar dois parâmetros: a curva de acionamento temperatura x tempo e o material do isolamento. Como resposta, o projetista saberá se com aquele material e aquela curva escolhida corre-se alto risco ou não do surgimento de trincas. Esse trabalho de formatura foi inspirado em um problema real ocorrido com uma máquina da ABB .

## **2 HIDROGERADOR - PARTES E FUNCIONAMENTO:**

Um hidrogerador é uma máquina elétrica cuja função é gerar tensão/corrente elétrica para alimentar cidades, indústrias etc. Essa máquina possui basicamente duas partes importantes: o rotor e o estator. O rotor tem o formato de uma fatia de cilindro e é movido, através de um eixo central, pela turbina hidráulica. Sua periferia é constituída por pólos. Os pólos são eletroímãs energizados por corrente contínua. Cada pólo possui uma polaridade norte ou sul e são distribuídos de tal forma que temos pólos norte e sul distribuídos alternativamente pela periferia do rotor. Enquanto o rotor, com seus pólos, constitui a parte móvel do hidrogerador, o estator é sua parte fixa. Sua forma é a de um anel que envolve toda a periferia do rotor. A parte interna do estator acompanha a periferia circular do rotor, distanciado apenas por alguns milímetros. Por toda a periferia interna do estator estão distribuídas várias barras de cobre. Essas são as barras estatóricas onde será induzida a corrente elétrica. Essas barras estatóricas são posicionadas verticalmente na periferia do estator. Suas extremidades são arranjadas duas a duas formando juntas. Essas ligações são feitas de tal forma que se constitui um conjunto de espiras de cobre formando assim o enrolamento do estator. Essas juntas de barras estatóricas possuem um isolamento de massa epoxi que apresenta-se no estado sólido e um envoltório de resina epoxi que chamarei de "capa". Esse isolamento da junta composto por massa mais capa é exatamente o objeto de meu estudo e será mostrado mais adiante.

Os pólos que passam em frente a barra girando com o rotor são dispostos alternadamente como norte e sul fazendo assim, do ponto de vista

da barra, que o campo magnético seja variante. Como, para espira de cobre (formada por barras e suas juntas) o campo magnético oscila ora sul, ora norte, existe a presença de um fluxo magnético variante. De acordo com a lei de Faraday - Lenz, surge uma força eletromotriz contrária a variação do fluxo magnético e é desta forma que a corrente que alimenta a rede é induzida.

Sendo assim, as partes de um hidrogerador vistas foram:

Rotor;

Pólos;

Estator;

Barras Estatóricas;

Juntas de Barras Estatóricas

Isolamento de barras estatóricas.

As figuras a seguir mostram respectivamente: figura 1 : montagem de um hidrogerador de Itaipu, figura 2 : corte de um hidrogerador ressaltando a localização das juntas de barras estatóricas; figura 3 e 4 : ilustrações de uma junta e seu isolamento composto de massa e capa (fotos tirada diretamente da tela do ansys após o modelamento).

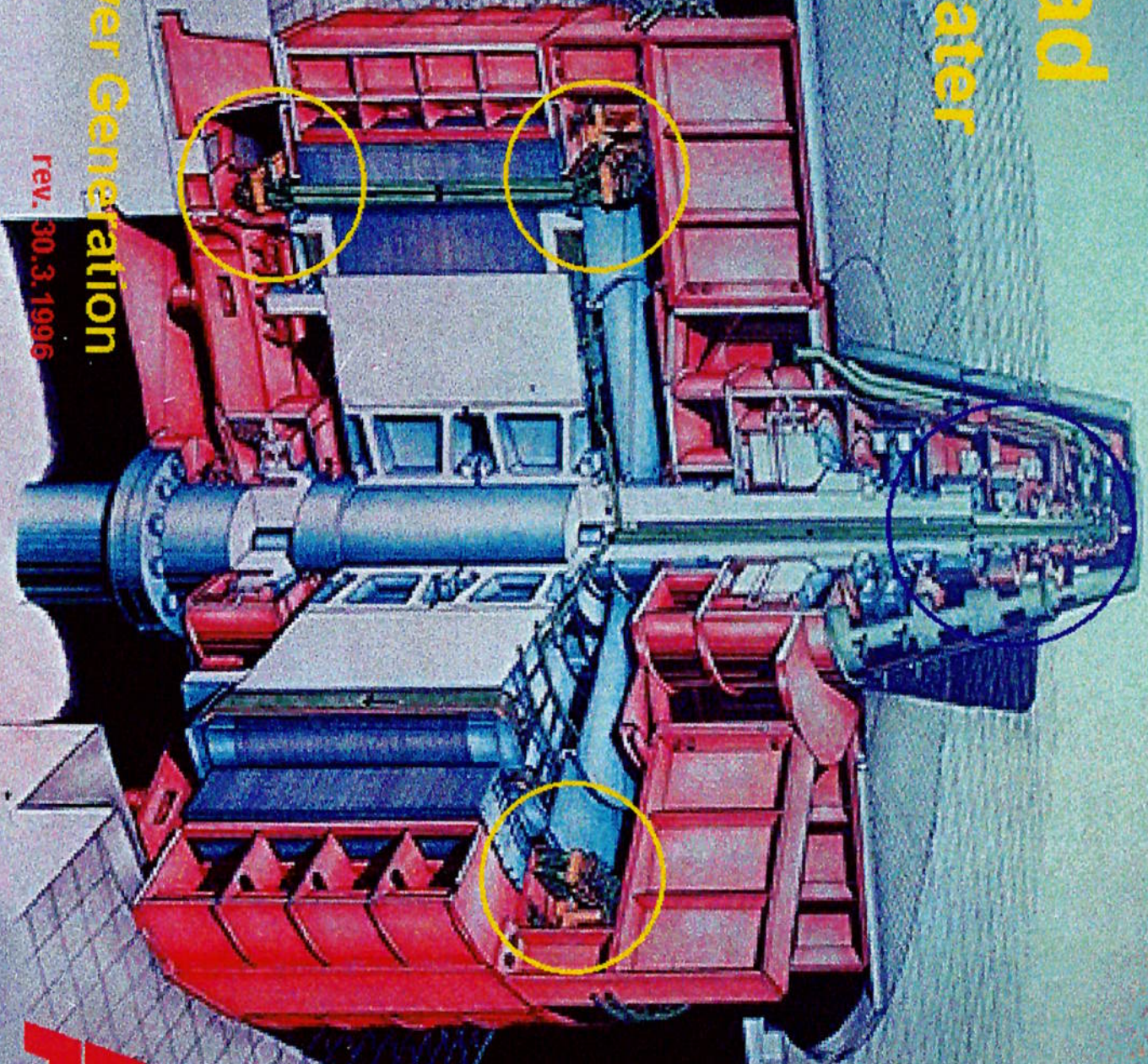
# CENTRALES HIDROELECTRICAS



**ABB**  
ASEA BROWN BOVERI

# Tonstad

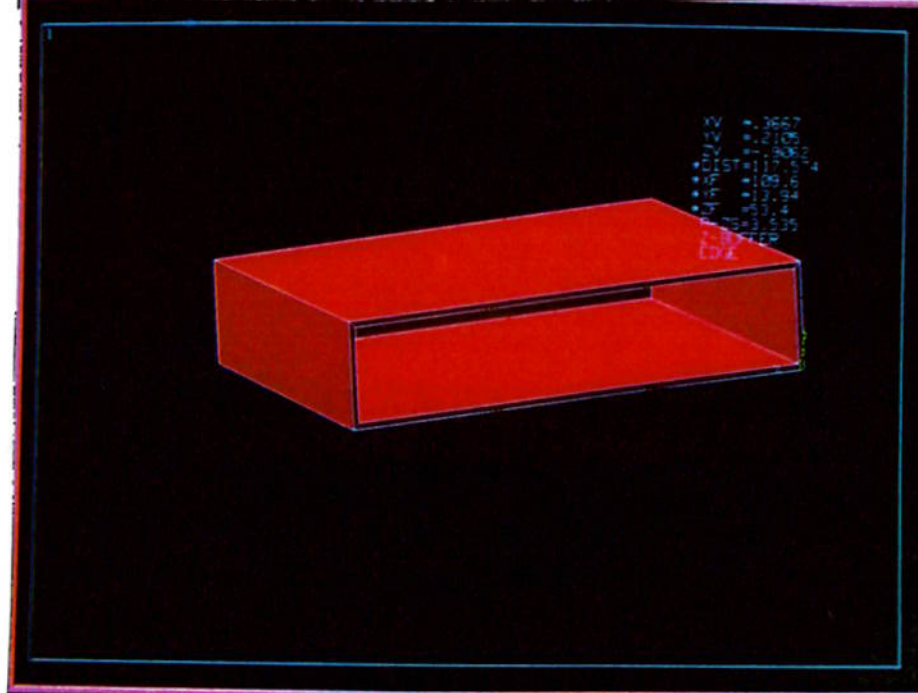
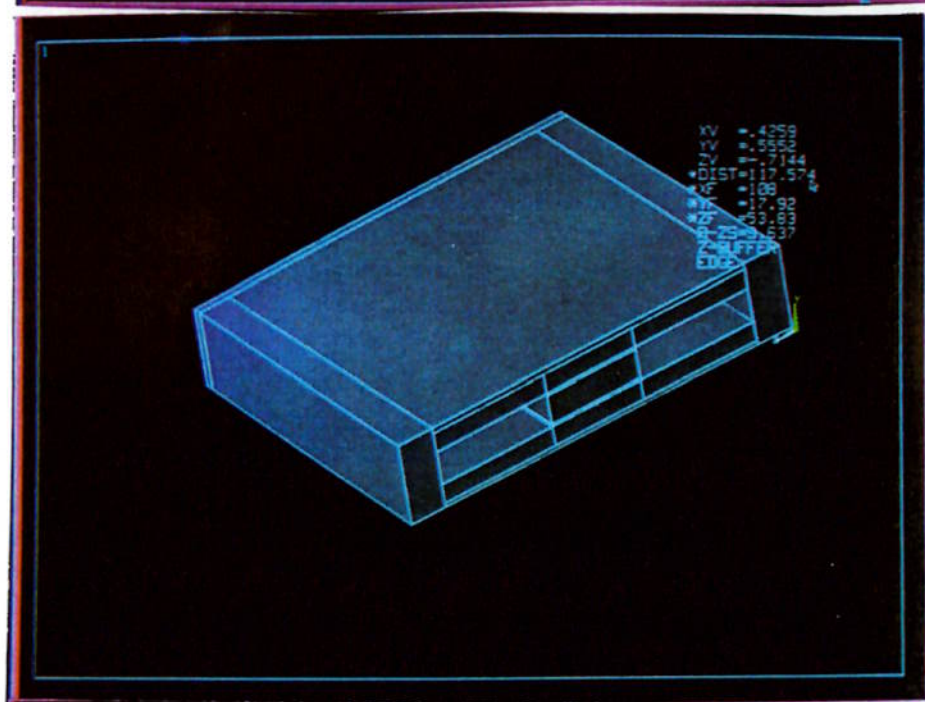
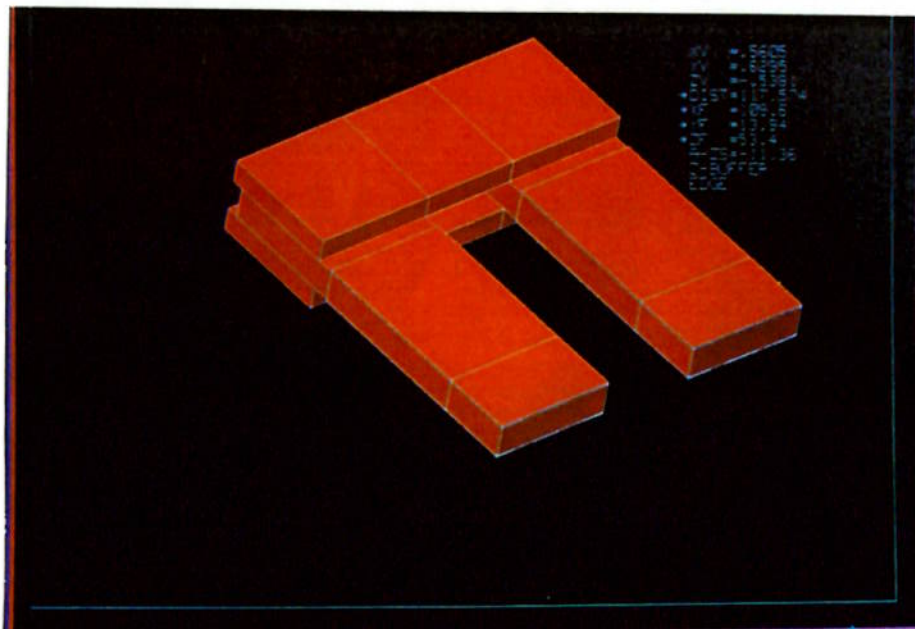
## Water/Water Cooled



HYDRO Power Generation

rev. 30.3.1996







### **3 HISTÓRICO**

Este trabalho foi baseado em meu período de estágio na ABB - Asea Brown Boveri empresa sueca - suíça líder mundial no ramo de energia. Na minha área, centrais hidroelétricas, o principal produto é o hidrogerador. Uma das máquinas que a ABB produz foi exposta a um regime de trabalho como nenhuma outra. A máquina não trabalha continuamente e por isso é ligada e desligada continuamente, sempre partindo de uma temperatura ambiente. Além disso, sua partida é extremamente rápida, chegando a plena carga em cerca de 3 minutos. Na primeira verificação da máquina observou-se o aparecimento de trincas na capa de isolamento das juntas. Esse evento gerou preocupação e a necessidade de um estudo teórico para que se compreendesse o fenômeno e se evitasse que o mesmo viesse a ocorrer novamente.

#### **OS PROBLEMAS QUE PODEM OCORRER EM CASO DE APARECIMENTO DE TRINCAS**

Com o surgimento de trincas existe o pior de todos os riscos que é o de curto circuito através de faíscas com outra junção próxima ou partes da carcaça ou guias de ar que também se encontram muito próximas. Um eventual curto poderia requerer troca de todo o enrolamento custando milhões de dólares. Mesmo que o curto não venha a ocorrer, a presença de trincas pode significar:

*- Atraso no pagamento do cliente.*

Estando algum evento contratual de pagamento condicionado ao perfeito funcionamento e estado da máquina , ao surgirem as trincas o cliente pode postergar o pagamento até que o problema esteja resolvido , gerando prejuízo para o fabricante ( nesse caso , a ABB ).

*- Multa por atraso.*

Uma vez que a máquina ainda não esteja em condições ótimas de operação isso pode significar atraso de entrega e portanto passível de incidência de multa.

*- Multa por tempo parado.*

*- Indenização por lucros cessantes.*

Uma vez que as trincas podem significar parada da máquina, isso pode gerar indenização pelo rompimento do fluxo de receitas.

*- Despesas no pós - venda.*

Devido ao problema que pode surgir, o tempo gasto com telefonemas, faxes, reuniões, viagens, mobilização de pessoal etc representam despesas extras , gerando impacto no custo do projeto.

*- Despesas com reparos.*

O conserto, troca ou reparo de eventual curto significariam custos elevadíssimos podendo chegar a dezenas de milhões de dólares.

*- Desgaste da imagem.*

Sempre que surgem problemas de má qualidade a imagem da empresa é afetada representando um custo intangível mas existente.

#### **4 BENEFÍCIOS OBTIDOS COM ESSE TRABALHO**

Esse trabalho terá como resultado as tensões geradas na capa devido a uma certa curva de aquecimento. Assim, pode-se mudar as propriedades do material e testar o mesmo para uma dada curva ou testar a curva de aquecimento.

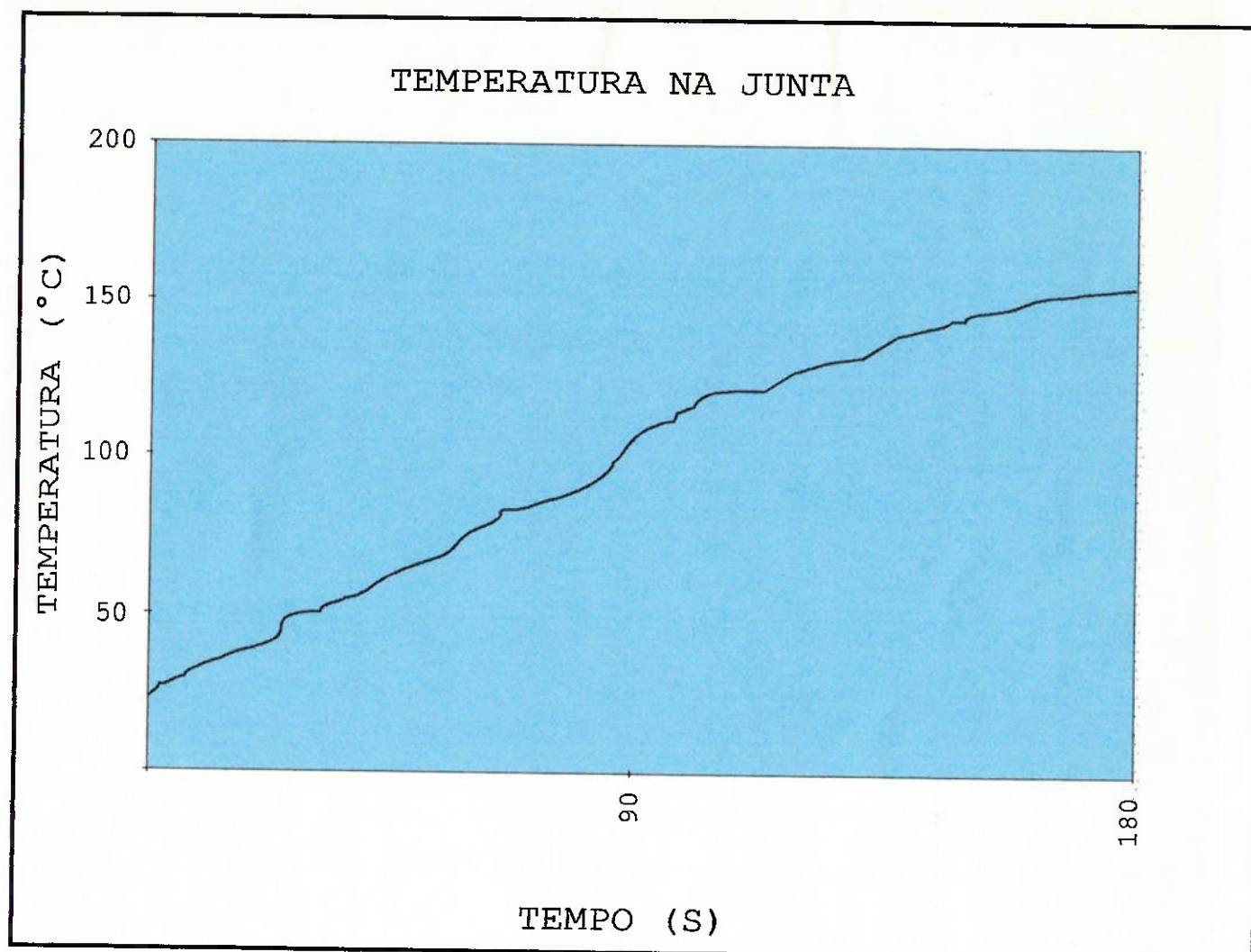
Portanto, como possibilidade posterior ao trabalho um projetista teria a possibilidade de:

- Simular diversos materiais
- Escolher assim o material mais apropriado
- Simular várias curvas de potência x tempo
- Sugerir ao cliente a curva apropriada
- Possibilitar a parametrização um trabalho complementar que só pedirá alguns parâmetros do desenho e automaticamente o fará.

## **5 O TRANSIENTE TÉRMICO ESTRUTURAL**

O transiente térmico - estrutural que enfocarei ocorre no início do funcionamento de uma determinada máquina que sai de uma temperatura ambiente ( $23^{\circ}\text{C}$ ) e corrente elétrica 0A e chega a 4000A e  $150^{\circ}\text{C}$  em cerca de 3 minutos. Esse regime transitório térmico do cobre que gera, na massa e na capa, tensões que podem levar até ao surgimento de trincas (como já ocorreu) é que será objeto de meu estudo. Portanto as trincas aparecem no material isolante - conjunto capa e massa.

A curva de aquecimento apresenta-se a seguir na figura 5.



**FIGURA 5**  
*Gráfico da curva temperatura do cobre x tempo (experimental)*

## 6 HIPÓTESES

No início dos estudos foram propostas algumas hipóteses iniciais que relacionassem surgimento de trincas às suas possíveis causas , com o intuito de isolar aquela (s) mais provável (is) e em seguida possibilitar a modelagem do problema. Foram elas:

***Será que o que ocorreu não foi uma especificação errada da massa epoxi e/ou da capa ( resina de epoxi ) no tocante a resistência a temperatura de trabalho ?***

O primeiro passo foi o levantamento das especificações e os pedidos de compra da massa e capa. A primeira suspeita era de que o material empregado não suportasse, mesmo em regime permanente, temperaturas daquela ordem. Essa suspeita justifica-se pois existem várias classes de materiais como classe f ou h cuja diferenciação é justamente a máxima temperatura que resistem em regime permanente. Assim, poder-se-ia ter incorrido no erro de ter sido especificado ou comprado massa que não suportasse 150° C nem em regime permanente.

Verifiquei que os materiais especificados e comprados (obviamente deveriam ser os mesmos) suportariam as temperaturas envolvidas no problemas e portanto estando assim correta a especificação do projetista. Mesmo que não suportassem, o mecanismo de colapso da massa quando exposta a temperaturas mais elevadas que o permitido - dado levantado no fabricante

de ambos os materiais - seria diferente do aparecimento de trincas, na realidade o fenômeno que deveria ser observado seria o derretimento da massa e a carbonização da capa. Portanto, fica refutada a hipótese de escolha incorreta de material no tocante a suportar altas temperaturas em regime permanente.

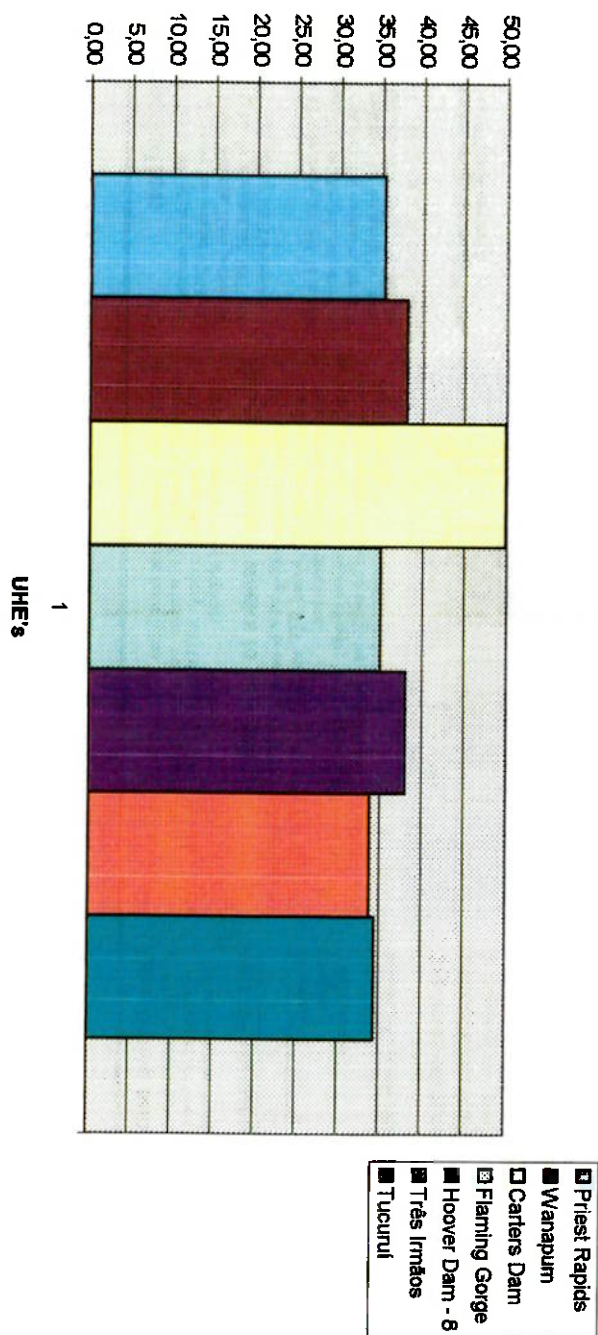
***Será que a relação volume interno da capa / volume do cobre era inadequada ou seja foi muito pequena?***

Minha preocupação era se não haveria pouca massa entre o cobre e a capa do que normalmente exige o padrão utilizado pela ABB, o que significaria maior rigidez da peça e desrespeito ao know-how que traz sabedoria impírica. Fazendo um levantamento da relação da proporção de Cobre/Capa em porcentagem de várias máquinas similares já construídas pela ABB, chegou-se a conclusão que não houve este problema, estando o projeto dentro da média levantada. Além disso percebemos que existe uma outra máquina onde a relação é menor do que na máquina em estudo - constituindo-se em um caso bem crítico, ou seja, grande quantidade de cobre em relação ao volume interno da capa. Nessa situação crítica nenhum problema foi verificado e portanto essa hipótese não deve ser considerada na futura modelagem. A seguir, mostra-se a tabela1 mostrando os dados e a figura 6 comparando as máquinas.

| Máquina        | Características |         |        | Dados da Capa |      |         |      | Dados da Barra |             |              |        | Dados do Olhal |         |        |             | Volumes     |             |          |           | Proporção de Cobre /Capa<br>(em %) |
|----------------|-----------------|---------|--------|---------------|------|---------|------|----------------|-------------|--------------|--------|----------------|---------|--------|-------------|-------------|-------------|----------|-----------|------------------------------------|
|                | Potência        | Tensão  | Altura | Comprimento   |      | Largura |      | Abrasada       |             | Seção Normal |        |                |         | Capa   | Barra (2 X) | Olhal (2 X) |             |          |           |                                    |
|                |                 |         |        | Topo          | Base | Topo    | Base | Altura         | Comprimento | Largura      | Altura | Comprimento    | Largura | Altura | Comprimento | Largura     |             |          |           |                                    |
| Priest Rapids  | 100 MVA         | 13,8 KV | 134    | 173           | 177  | 39      | 41   | 48             | 50,5        | 13,4         | 83     | 50,5           | 15,4    | 50,8   | 141         | 9,5         | 838 288,0   | 194061,4 | 136093,2  | 35,19                              |
| Manapum        | 109,25 MVA      | 13,8 KV | 134    | 173           | 177  | 39      | 41   | 48             | 55,08       | 13,4         | 83     | 55,08          | 15,4    | 50,8   | 150         | 9,5         | 838 288,0   | 211661,4 | 144780    | 37,99                              |
| Carters Dam    | 131,759 MVA     | 13,8 KV | 135    | 192           | 196  | 45,5    | 46   | 38             | 67,7        | 19           | 94     | 67,7           | 19,8    | 76,2   | 175         | 9,3         | 1.198 280,0 | 349765,3 | 248031    | 49,89                              |
| Fleming Gorge  | 56,108 KVA      | 11,5 KV | 146    | 183           | 187  | 40      | 46,6 | 72             | 58,75       | 12           | 71     | 58,75          | 13,84   | 63,5   | 162         | 9,3         | 1.168 135,9 | 216980,2 | 191338,2  | 34,92                              |
| Hoover Dam - 8 | 67,077 KVA      | 16,5 KV | 134    | 159           | 162  | 31,5    | 34,5 | 54             | 44,06       | 14,4         | 77     | 44,06          | 16,44   | 50,8   | 138,1       | 6,35        | 710 032,5   | 180071,5 | 89096,596 | 37,91                              |
| Tês Ilhões     | 170 MVA         | 14,4 KV | 116    | 160           | 162  | 41      | 43   | 45             | 45,9        | 14,4         | 68     | 45,9           | 16,4    | 38,1   | 141,8       | 9,5         | 784 508,0   | 161861,8 | 102649,02 | 33,72                              |
| Tucuruí        | 350 MVA         | 13,8 KV | 160    | 156           | 157  | 27      | 28   | 53             | 46,7        | 8,8          | 104    | 46,7           | 10,8    | 50,8   | 137         | 6,35        | 688 640,0   | 148486,6 | 88386,92  | 34,39                              |

Todas as medidas estão em milímetros e as que se referem a volume estão em milímetros cúbicos.

**Estudo Comparativo de Porcentagem de Volume de Cobre nas Capas das Cabeças do Enrolamento Estatórico**



***Hipótese do aparecimento de trincas devido forte a expansão do cobre.***

A hipótese mais forte de geração de tensões é devido a grande e rápida expansão do cobre no transiente. A hipótese é de que esta expansão poderia não ter sido acompanhada satisfatoriamente pela massa e capa o que geraria altas tensões e conseqüentemente o aparecimento de trincas. Esta hipótese não pôde ser refutada e assim sendo será considerada em meu estudo.

***Hipótese do alto gradiente térmico.***

Outra hipótese para justificar o aparecimento de trincas é a de que o forte gradiente térmico presente na massa e capa (  $150^{\circ}\text{C}$  na interface massa/cobre e a temperatura ambiente  $23^{\circ}\text{C}$  fora da capa).

***Hipótese de colapso por fadiga.***

De acordo com ensaios realizados (ensaios que serão apresentados em capítulo a parte) que visavam expor a junta a vários ciclos para se verificar se o problema estava ligado a fadiga do material , este não era o mecanismo de colapso , pois foi verificado, em vários corpos de prova, o surgimento de trincas ainda no primeiro ciclo. Sendo assim, a hipótese de fadiga não deve ser considerada na futura modelagem .

Em resumo as hipóteses a serem testadas por nosso modelo são :

Hipótese do aparecimento de trincas devido forte a expansão do cobre.

Hipótese do aparecimento de trincas devido ao alto gradiente térmico.

A análise do software leva em conta ambas as hipóteses uma vez que a solução é transiente térmica e estruturalmente.

## **7 SOLUÇÃO APRESENTADA**

Visando praticamente eliminar a possibilidade de aparecimento de trincas, será feito um estudo teórico da máquina que apresentou o problema de trincas através do desenho da junta e posterior modelagem, simulação e a análise através do Software de elementos finitos Ansys 5.3 ( o qual será executado a partir de uma workstation hp em ambiente UNIX).

Paralelamente ao estudo em elementos finitos serão executados ensaios em bancada visando entender o fenômeno, avaliar as possíveis hipóteses e ao final validar o modelo teórico proposto .

## **8 ESTUDO DO SOFTWARE E MODELAGEM**

Como parte integrante dos objetivos didáticos deste trabalho está o aprendizado por minha parte do software ANSYS. Sem nenhuma experiência anterior, foi gasto a maior parte do tempo no estudo do software. Não tive a oportunidade de realizar curso ficando inteiramente sob minha responsabilidade a consulta ao manual e execução de exercícios práticos no computador.

### **MODELAGEM**

A fase de desenho no ANSYS ,ao contrário do que possa parecer, não é muito simples. O desenho deve ser de tal forma que permita a execução da malha de elementos . Permitir a execução da malha abrange cuidados com a geometria e a escolha certa entre as várias formas de modelagem - modelamento por sólido, mapeamento da geometria, construção direta dos elementos , etc . Às vezes há a necessidade de se mapear as áreas. Este mapeamento consiste em orientar o gerador de malhas sobre onde deverão ser colocados os nós para garantir elementos não exageradamente distorcidos. Por exemplo se o sólido é um cubo , o mapeamento consiste em se dividir as arestas igualmente em digamos dez pontos , que para o software significam nós , estes pontos serão unidos com os nós da aresta oposta ( subdividida da mesma forma ) gerando uma malha de elementos regulares - cubos iguais . Outras vezes há necessidade de se refinar a malha em alguns

pontos e outras de se optar por modelar diretamente os elementos ao invés dos sólidos.

#### MODELAGEM - PRIMEIRA TENTATIVA:

A primeira tentativa foi uma modelagem por sólidos e com free mesh, ou seja, deixando a cargo do software desenhar a malha. A construção do modelo foi baseada em formas regulares como paralelepípedos. Foi dividida espacialmente a peça, sendo desenhada em volumes convenientes. Calculadas as coordenadas, foi implementado o desenho e houve uma tentativa de gerar a malha. Essa modelagem não se mostrou adequada, pois as malhas geradas possuíam elementos distorcidos.

#### SEGUNDA TENTATIVA

Algumas simplificações foram tentadas ainda modelando -se com sólidos e utilizando free mesh, tais como desconsideração de pequenos ângulos, mudança do tipo de elemento de sólido para elementos de chapa quando o sólido fosse estreito, e outros pequenos ajustes de geometria. Os resultados continuavam insatisfatórios.

#### TERCEIRA TENTATIVA

O próximo passo foi estudar como o computador realiza o free mesh (que é a construção automática da malha de elementos e nós) e tentativas de fixar-se alguns parâmetros para que a malha fosse mais regular e com número de elementos razoáveis em termos de tempo e capacidade de processamento.

#### QUARTA TENTATIVA:

A quarta tentativa foi a de se mapear os sólidos do modelo. Mapear significa dividir racionalmente todas as arestas dos sólidos de forma compatível de forma que no momento em que o computador fizer o free mesh ele respeite as divisões criando uma malha regular. Como resultado, os elementos até se mostraram regulares mas houve problemas de nós não transmitirem esforços um para os outros o que me levou a quinta tentativa.

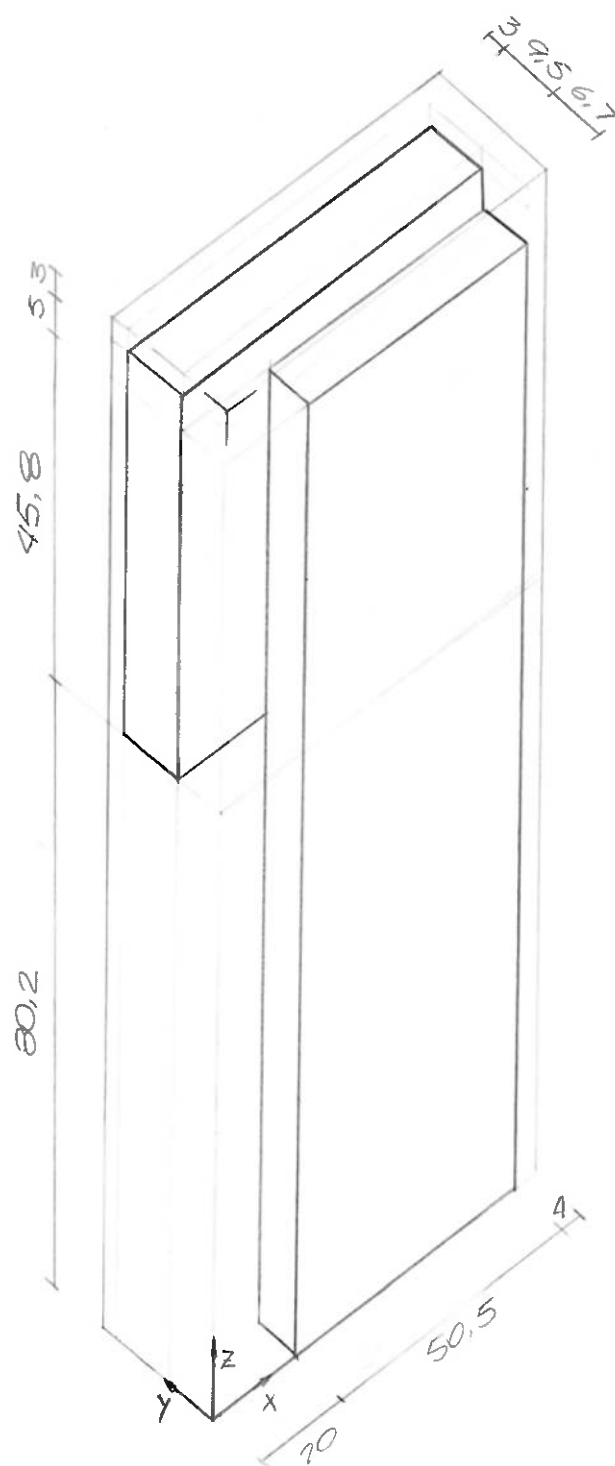
#### QUINTA TENTATIVA:

Abandonei o modelamento por sólidos e parti para construção direta dos elementos. Desenhei no papel a geometria, defini a disposição dos elementos quanto ao seu número, tamanho e disposição nesta geometria. Com esse rascunho base defini todos os nós e sua numeração. Tendo rascunhado toda a geometria em nós, parti para o modelamento :

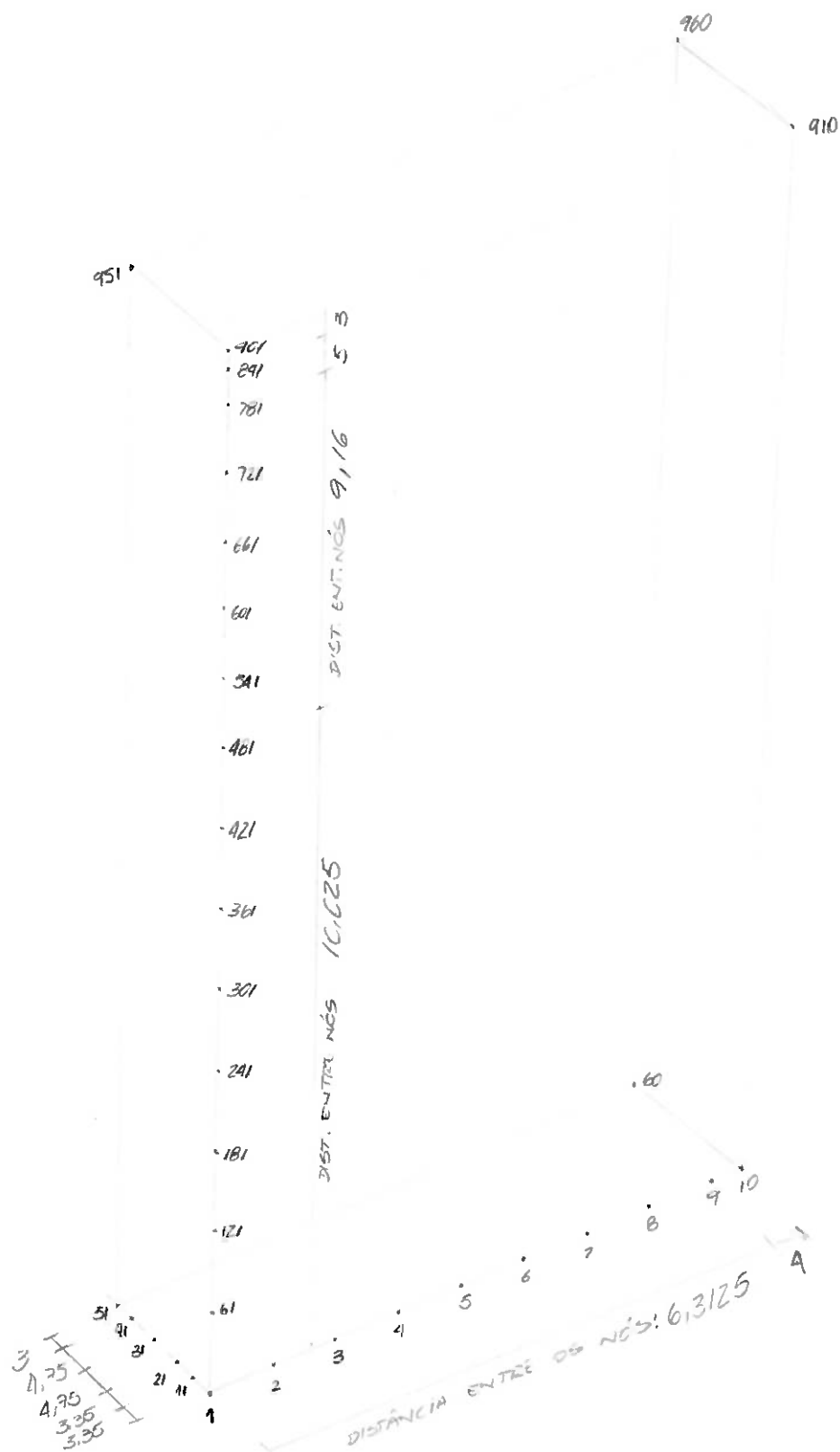
Com o comando Create Nodes criei os primeiros nós da base 1 e 9. Através de um comando de criação de nós intermediários criei os nós 2 a 8 todos equidistantes. Como o 10º nó não seguia as mesmas distâncias este foi criado isoladamente. Para terminar o plano da base criei mais cinco fileiras como cópia da primeira. Tinha até então 60 nós. Baseado então no desenho e utilizando a mesma técnica de cópia criei todos os 961 nós do modelo. A criação dos elementos foi semelhante. Criei o primeiro através de oito nós já definidos e partir para cópia. No final bastou selecionar o conjunto de elementos que compunham o cobre e dar as propriedades do material, tipo de

elemento (sólido de oito nós, elemento térmico e estrutural) e criar o componente cobre. O mesmo para a massa e a capa.

A seguir na figura 7 está o desenho do modelo e a figura 8 mostra como foram construídos os nós.



**FIGURA 7**  
***Desenho mostrando as dimensões do modelo. Por simetria, só foi modelado um quarto do conjunto.***



## 9 PROPRIEDADES

O cobre, a resina e a massa serão considerados isotrópicos. Apesar da massa ser um compósito não existem fibras e portanto nenhuma direção orientada. A presença de bolhas de ar é desprezível e existindo apenas em níveis microscópicos. Com isso, temos uma certa segurança na aceitação desta hipótese.

Foram utilizadas as seguintes propriedades:

### COBRE:

$$E = 121 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha = 17 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\nu = ,33$$

$$k = 0,381 \text{ J / mm.s.}^\circ\text{C}$$

$$c = 420 \text{ J / kg.}^\circ\text{C}$$

### MASSA:

$$E = 8.9 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha = 50 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\nu = .08$$

$$k = 1,465 \text{ J / mm.s.}^\circ\text{C}$$

$$c = 4000 \text{ J / kg.}^\circ\text{C}$$

CAPA:

$$E = 34,2 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha = 65 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\nu = .08$$

$$k = 2,511 \text{ J / mm.s.}^\circ\text{C}$$

$$c = 4180 \text{ J / kg.}^\circ\text{C}$$

$$\sigma_e = 98 \text{ à } 105 \text{ MPa}$$

onde :

$E$  = módulo de Young;

$\alpha$  = coeficiente de expansão térmica;

$\nu$  = coeficiente de Poisson;

$c$  = calor específico;

$k$  = resistividade térmica;

$\sigma_e$  = tensão de escoamento;

## **10 PROCESSAMENTO**

### **ESCOLHA DO TIPO DE ELEMENTO**

Para o cobre e massa foram escolhidos os elementos sólidos de oito nós. Para a capa foi escolhido um elemento de chapa. Ambos são do tipo coupled-field que permite a análise térmica e estrutural.

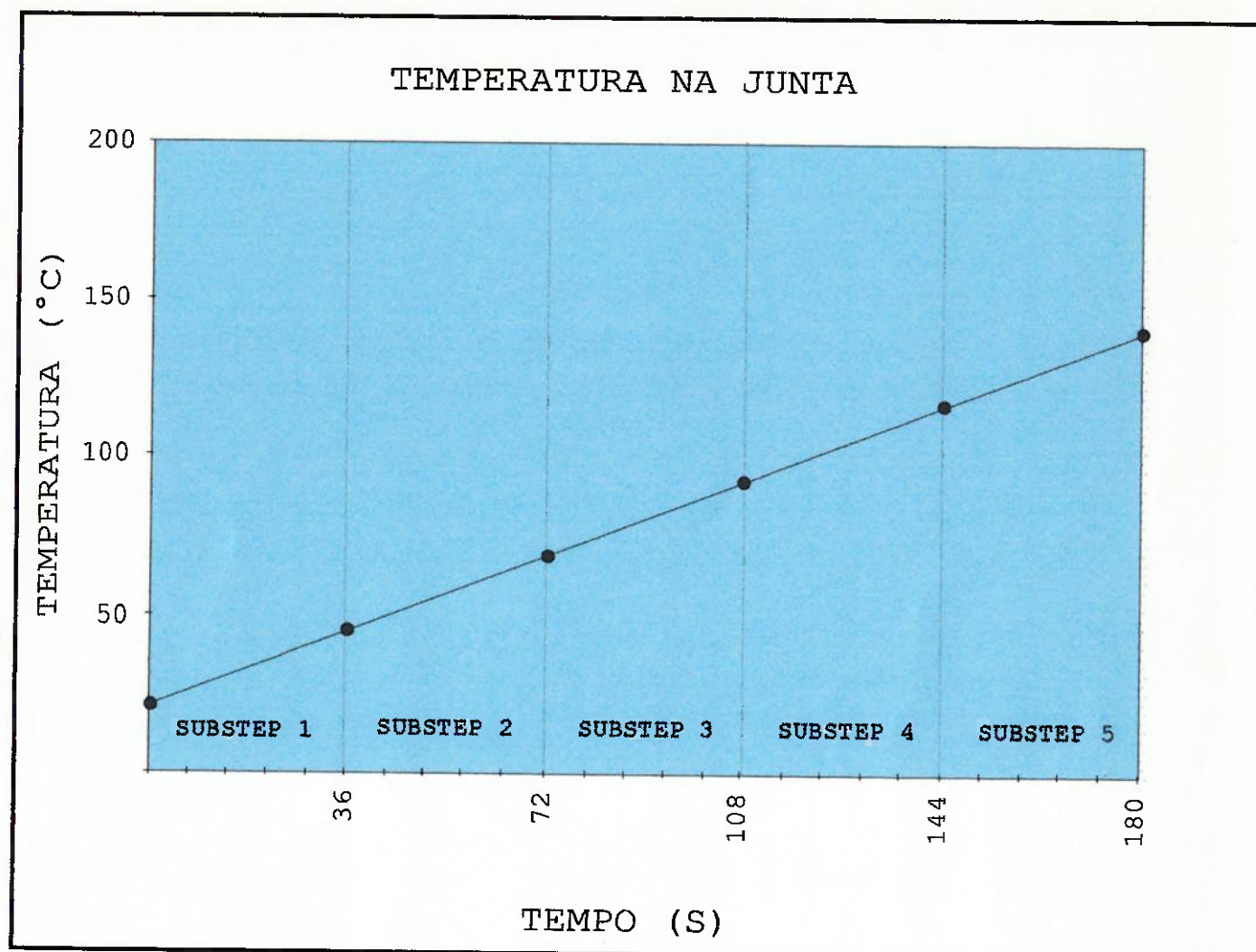
### **RESTRIÇÕES E CARREGAMENTOS**

Os nós da base de cobre receberam restrições em todos os graus de liberdade ficando por tanto engastados. Os nós dos planos de simetria receberam as restrições devidas como no deslocamento perpendicular a esse plano. Os elementos da capa tiveram sua temperatura mantida a 23°C devida a forte ventilação forçada e indícios empíricos medidos.

A curva de temperatura foi inputada no programa através de load-steps. Na análise transitória é necessário entrar-se com o carregamento através desses load-steps que são intervalos de tempo onde um pequeno trecho da curva de carregamento pode ser aproximado por uma rampa. O software entende que a temperatura inicial do load-step é a temperatura final do load-step anterior. Portanto, basta entrarmos com a temperatura no instante final. O primeiro load-step serve apenas para impormos as condições iniciais.

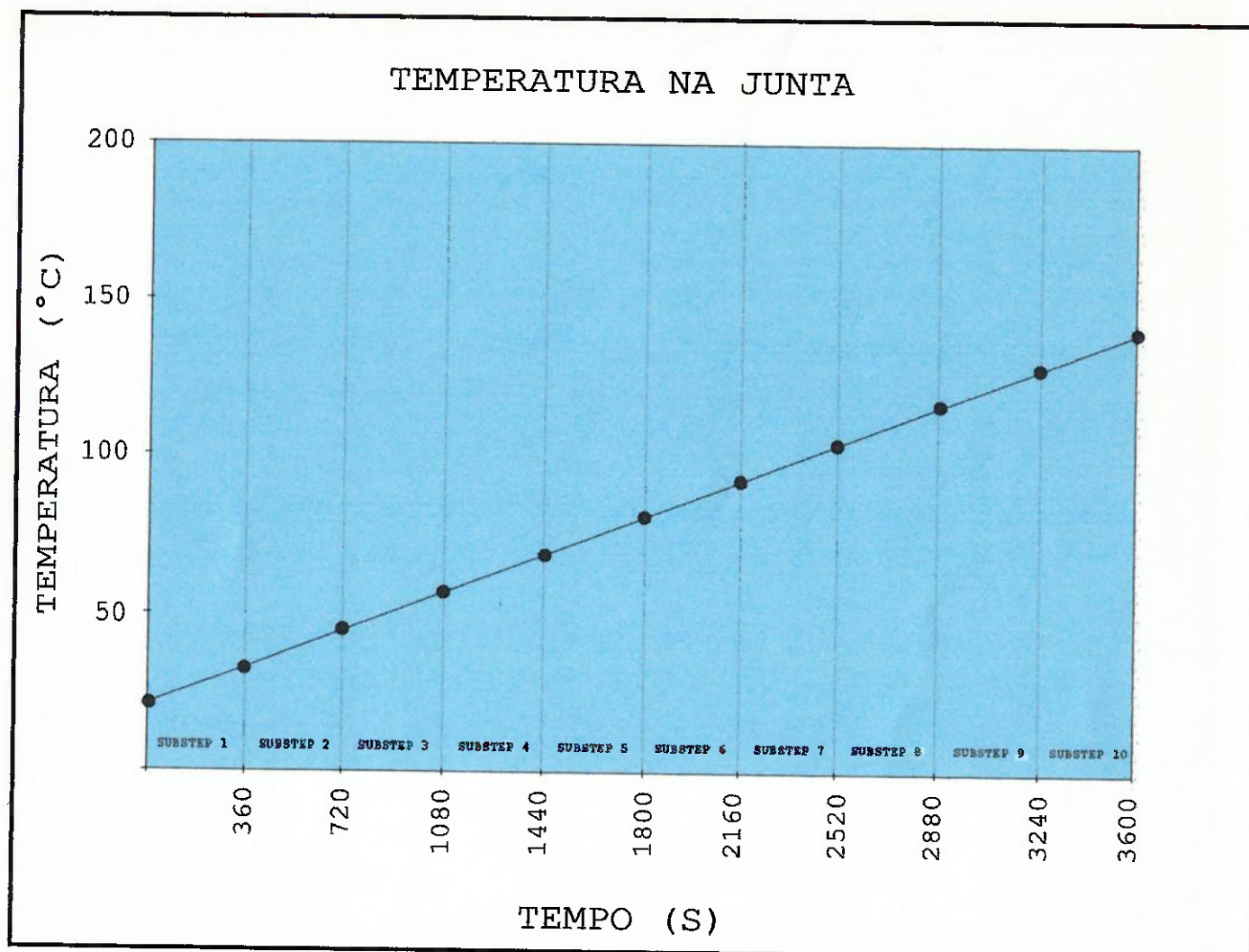
No caso da temperatura do cobre, dividiu-se a curva de temperatura real em algumas partes e aproximou-se por trechos (load-steps) retos.

Foram feitos estudos com várias curvas de aquecimento e são ressaltadas nas figuras 9 e 10 a seguir a curva de aquecimento em 180s e em 3600s.



**FIGURA 9**

*Aproximação da curva temperatura do cobre / tempo inputada no software através de load-steps. Tempo total 180s*



**FIGURA 10**

*Aproximação da curva temperatura do cobre / tempo inputada no software através de load-steps. Tempo total 3600s*

## 11 ENSAIOS

Foram feitos dois tipos de testes. O primeiro visava testar a hipótese de que a trinca ocorria devido à fadiga causada por ciclos térmicos. Foram simuladas as condições de trabalho, ou seja, aquecimento a 150°C em aproximadamente três minutos e posterior resfriamento natural. A conclusão foi que não é a fadiga a causadora das trincas uma vez que todos os seis corpos de prova trincaram no primeiro ciclo.

O segundo conjunto de testes realizados visou determinar uma relação entre a taxa de aquecimento e o aparecimento de trincas. A conclusão foi que esta relação existe sendo que trincas aparecem quanto mais rápido o aquecimento.

Para concluir isso, fizemos quatro procedimentos de teste nos quais cada um possui uma diferente taxa de aquecimento do cobre a saber:

Procedimento 1 : 45°C por minuto;

Procedimento 2 : 22,5° C por minuto;

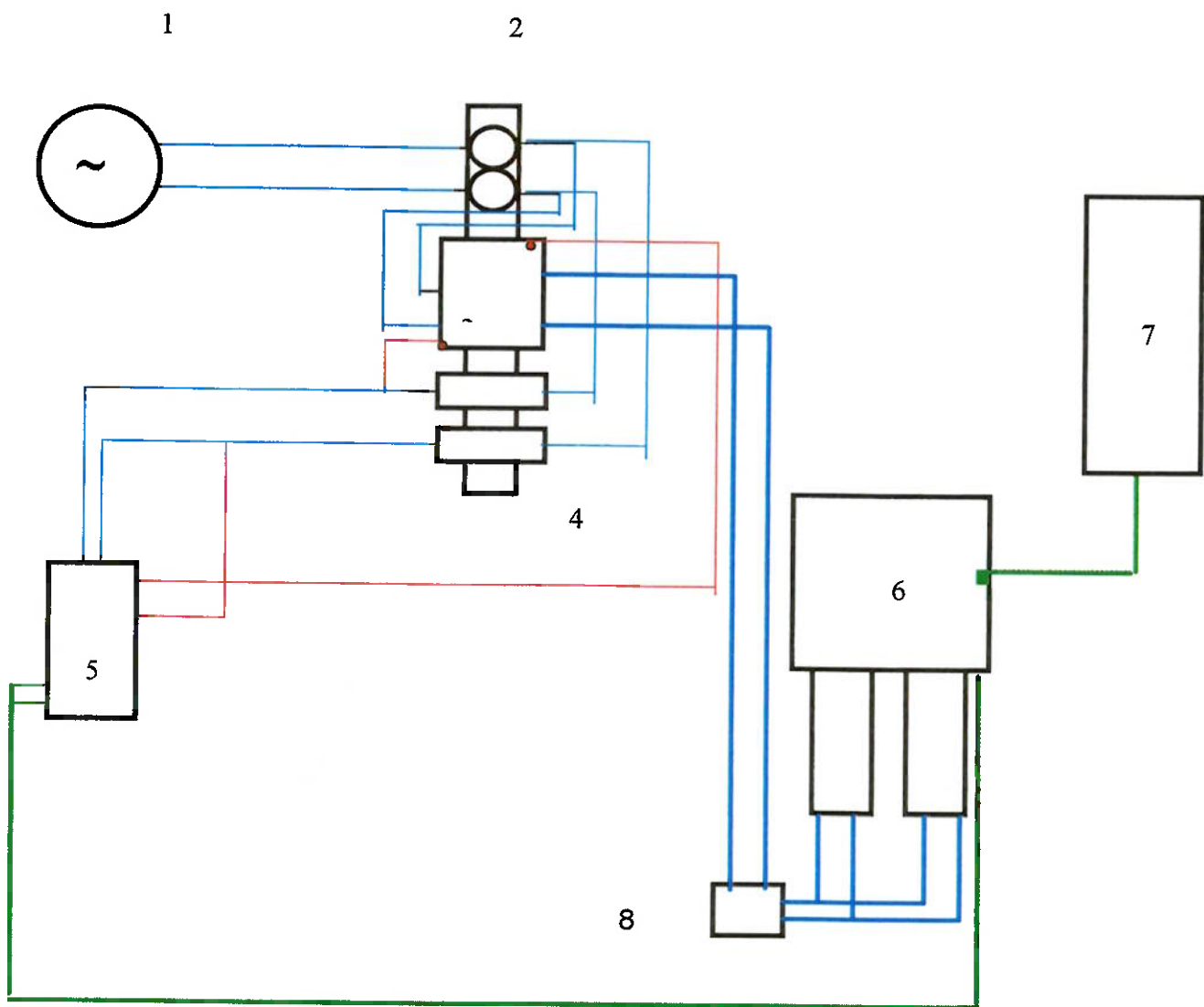
Procedimento 3 : 10° C por minuto;

Procedimento 4 : 2° C por minuto;

Os resultados encontram-se em anexo mostrando inclusive um esboço do aparecimento das trincas.

## A BANCADA

Para ambos os testes foi concebida e construída uma bancada cujo esquema da instalação e a foto encontra-se em seguida nas figuras 11 e 12. Basicamente temos um corpo de prova cujas barra de cobre possuem orifício onde são conectadas resistências elétricas para proporcionar o aumento de temperatura. Uma fonte de 220 V alimenta as resistências. O aquecimento é regulado por um contator que por sua vez é controlado por um controlador de temperatura programável (cuja especificação está anexa).



Feeder of 220 V

Feeder of contactor coil

Termocouple

- 1- Source of 220 V.
- 2- Diazed Fusible - 25 A.
- 3- Contactor until 500 V - 55A.
- 4- Circuit Breakers - 2 A
- 5- Temperature Control.
- 6- Sample with resistences
- 7- Multimeter for external temperature (boot)
- 8- Connection.



**FIGURA 12**  
*Foto da bancada de testes*

## 12 CONCLUSÃO

Constam a seguir duas figuras que são o resultado das análises feitas para um aquecimento de 180s (figura 13) e outro de 3600s (figura 14).

A conclusão mais importante no é que as tensões são inversamente relacionadas a velocidade de aquecimento do cobre. Assim sendo a hipótese de rápida expansão do cobre fica evidenciada e podemos concluir que o melhor a se fazer para evitar o problema seria a ABB sugerir ao cliente que utiliza-se uma curva de ligamento da máquina mais suave, ou seja, de uma hora ou mais.

Comparando os valores máximos de tensão com o limite de escoamento da capa (98 à 105 MPa) concluímos forte tendência de aparecimento de trincas na curva de 180s (tensão máxima = 346,545 MPa) e de não aparecimento na curva de 3600s (tensão máxima = 95,504 MPa).

Podemos concluir das figuras que a região crítica para ocorrência das trincas é a região do topo da capa na sua aresta maior. Secundariamente, outra região que apresentou tensões altas porém menores que a anterior foi na aresta como explicitado nas figuras.



ANSYS 5.3  
MAR 3 1998 38  
19:27:45  
NODAL SOLUTION  
STEP=2  
SUB =5  
TIME=181  
SEQV (AVG)  
TOP  
DMX =.19168  
SMN =33.255  
SMX =346.545  
SMXB=565.037

|  |         |
|--|---------|
|  | 33.255  |
|  | 68.065  |
|  | 102.875 |
|  | 137.685 |
|  | 172.495 |
|  | 207.305 |
|  | 242.115 |
|  | 276.925 |
|  | 311.735 |
|  | 346.545 |

**FIGURA 13**

*Resultado da análise transiente mostrando os valores de tensão (Von Mises) na capa da junta. Trata-se a curva de aquecimento de 23°C a 150°C em 180s. Os valores estão em MPa*



ANSYS 5.3  
MAR 3 1998  
19:36:26  
NODAL SOLUTION  
STEP=2  
SUB =5  
TIME=3601  
SEQV (AVG)  
TOP  
DMX =.052825  
SMN =9.165  
SMX =95.504  
SMDXB=155.719

|  |        |
|--|--------|
|  | 9.165  |
|  | 18.758 |
|  | 28.351 |
|  | 37.945 |
|  | 47.538 |
|  | 57.131 |
|  | 66.725 |
|  | 76.318 |
|  | 85.911 |
|  | 95.504 |

**FIGURA 14**

*Resultado da análise transiente mostrando os valores de tensão (Von Mises) na capa da junta. Trata-se a curva de aquecimento de 23°C a 150°C em 3600s. Os valores estão em MPa*

### **13 SUGESTÕES FUTURAS**

Futuramente um engenheiro projetista poderá utilizar a abordagem desse trabalho para testar materiais e curvas de aquecimento variados para escolher a melhor combinação.

Extrapolando os objetivos deste trabalho existe possibilidade de continuidade complementando o estudo que seria a parametrização. Esse estudo está vinculado às dimensões da máquina que apresentou a trinca, ficando assim restrita e este caso ou casos de outras máquinas que possam utilizar as mesmas dimensões. Para um caso mais geral onde qualquer máquina poderia ser simulada fica a carência de uma parametrização. Essa parametrização consiste em se desenvolver uma macro dentro do ANSYS que geraria o desenho automaticamente baseado em alguns parâmetros como algumas cotas ou coordenadas. O usuário poderia então seguir os procedimentos de processamento e análise que serão deixados por mim no final deste projeto. Outra melhoria ainda seria uma macro para o processamento, gerando automaticamente a malha e pedindo outros parâmetros como temperaturas.

## **ANEXO A**

**RESULTADO DE ENSAIOS DE CICLOS TÉRMICOS COM  
CURVA DE AQUECIMENTO DE 23°C A 150° EM 180s. TESTA  
HIPÓTESE DE FADIGA**

---

ENSAIO DE CICLOS TÉRMICOS NA CABEÇA DE PRIEST RAPIDS

---

|                              |                     |
|------------------------------|---------------------|
| Duração de cada ciclo : 300s | Corpo de prova N° 1 |
|------------------------------|---------------------|

Temperatura final do cobre: 148°C (Programada)

| Tempo (s) | Temperatura | Observações                      |
|-----------|-------------|----------------------------------|
| 0         | 25          | Começo do 1º ciclo               |
| 10        | 39          |                                  |
| 20        | 46          |                                  |
| 30        | 51          |                                  |
| 40        | 68          |                                  |
| 50        | 80          |                                  |
| 60        | 93          |                                  |
| 70        | 98          |                                  |
| 80        | 108         |                                  |
| 90        | 111         |                                  |
| 96        | 115         | Pequena trinca superior          |
| 100       | 117         | Aumento do comprimento da trinca |
| 110       | 120         | Trinca maior                     |
| 120       | 126         |                                  |
| 130       | 147         |                                  |
| 140       | 125         |                                  |
| 150       | 119         |                                  |
| 160       | 111         |                                  |
| 170       | 100         | Fechamento das trincas           |
| 180       | 95          |                                  |
| 190       | 89          |                                  |
| 200       | 79          |                                  |
| 210       | 71          |                                  |
| 220       | 66          |                                  |
| 230       | 60          |                                  |
| 240       | 56          |                                  |
| 250       | 50          |                                  |
| 260       | 47          |                                  |
| 270       | 42          |                                  |
| 280       | 37          |                                  |
| 290       | 33          |                                  |
| 300       | 27          | Final do 1º ciclo                |

---

**ENSAIO DE CICLOS TÉRMICOS NA CABEÇA DE PRIEST RAPIDS**


---

|                              |
|------------------------------|
| Duração de cada ciclo : 300s |
|------------------------------|

|                     |
|---------------------|
| Corpo de prova N° 2 |
|---------------------|

Temperatura final do cobre: 148°C (Programada)

| Tempo (s) | Temperatura | Observações                      |
|-----------|-------------|----------------------------------|
| 0         | 25          | Começo do 1ºciclo                |
| 10        | 38          |                                  |
| 20        | 46          |                                  |
| 30        | 53          |                                  |
| 40        | 67          |                                  |
| 50        | 80          |                                  |
| 60        | 94          |                                  |
| 70        | 100         |                                  |
| 80        | 109         |                                  |
| 87        | 112         |                                  |
| 90        | 116         | Aparecimento da trinca           |
| 100       | 117         | Aumento do comprimento da trinca |
| 110       | 119         |                                  |
| 120       | 129         |                                  |
| 130       | 148         |                                  |
| 140       | 123         |                                  |
| 150       | 117         |                                  |
| 160       | 110         |                                  |
| 170       | 101         |                                  |
| 180       | 96          | Trinca fechada                   |
| 190       | 88          |                                  |
| 200       | 79          |                                  |
| 210       | 70          |                                  |
| 220       | 67          |                                  |
| 230       | 59          |                                  |
| 240       | 55          |                                  |
| 250       | 48          |                                  |
| 260       | 45          |                                  |
| 270       | 39          |                                  |
| 280       | 35          |                                  |
| 290       | 30          |                                  |
| 300       | 25          | Final do 1º ciclo                |

---

**ENSAIO DE CICLOS TÉRMICOS NA CABEÇA DE PRIEST RAPIDS**
**Duração de cada ciclo : 300s**
**Corpo de prova N° 3**
**Temperatura final do cobre: 148°C (Programada)**

| Tempo (s) | Temperatura | Observações                |
|-----------|-------------|----------------------------|
| 0         | 23          | Começo do 1º ciclo         |
| 10        | 37          |                            |
| 20        | 44          |                            |
| 30        | 53          |                            |
| 40        | 66          |                            |
| 50        | 78          |                            |
| 60        | 93          |                            |
| 62        | 93          | Aparecimento da 1ª trinca  |
| 70        | 98          |                            |
| 80        | 103         |                            |
| 88        | 109         | Aparecimento da 2ª trinca  |
| 90        | 111         |                            |
| 100       | 115         |                            |
| 110       | 119         |                            |
| 120       | 126         | Trincas totalmente abertas |
| 130       | 145         |                            |
| 140       | 123         |                            |
| 150       | 116         |                            |
| 160       | 111         |                            |
| 170       | 99          |                            |
| 180       | 95          |                            |
| 190       | 89          |                            |
| 200       | 77          | Trincas fechadas           |
| 210       | 68          |                            |
| 220       | 57          |                            |
| 230       | 58          |                            |
| 240       | 55          |                            |
| 250       | 47          |                            |
| 260       | 43          |                            |
| 270       | 36          |                            |
| 280       | 33          |                            |
| 290       | 27          |                            |
| 300       | 23          | Final do 1º ciclo          |

## ENSAIO DE CICLOS TÉRMICOS NA CABEÇA DE PRIEST RAPIDS

Duração de cada ciclo : 300s

Corpo de prova N° 4

Temperatura final do cobre: 148°C (Programada)

| Tempo (s) | Temperatura | Observações              |
|-----------|-------------|--------------------------|
| 0         | 24          | Começo do 1ºciclo        |
| 10        | 34          |                          |
| 20        | 42          |                          |
| 30        | 52          |                          |
| 40        | 64          |                          |
| 50        | 75          |                          |
| 60        | 91          |                          |
| 70        | 97          |                          |
| 80        | 102         |                          |
| 90        | 110         |                          |
| 98        | 115         | Aparecimento da trinca   |
| 100       | 116         |                          |
| 110       | 120         |                          |
| 120       | 127         |                          |
| 130       | 147         | Trinca totalmente aberta |
| 140       | 124         |                          |
| 150       | 118         |                          |
| 160       | 113         |                          |
| 170       | 102         |                          |
| 180       | 96          |                          |
| 190       | 90          | Trinca fechada           |
| 200       | 79          |                          |
| 210       | 69          |                          |
| 220       | 58          |                          |
| 230       | 59          |                          |
| 240       | 56          |                          |
| 250       | 47          |                          |
| 260       | 44          |                          |
| 270       | 38          |                          |
| 280       | 35          |                          |
| 290       | 28          |                          |
| 300       | 24          | Final do 1º ciclo        |

## ENSAIO DE CICLOS TÉRMICOS NA CABEÇA DE PRIEST RAPIDS

Duração de cada ciclo : 300s

Corpo de prova N° 5

Temperatura final do cobre: 148°C (Programada)

| Tempo (s) | Temperatura | Observações                     |
|-----------|-------------|---------------------------------|
| 0         | 25          | Começo do 1º ciclo              |
| 10        | 37          |                                 |
| 20        | 43          |                                 |
| 30        | 55          |                                 |
| 40        | 65          |                                 |
| 50        | 78          |                                 |
| 60        | 93          |                                 |
| 70        | 100         |                                 |
| 80        | 105         |                                 |
| 90        | 115         |                                 |
| 100       | 119         |                                 |
| 102       | 122         | Aparecimento da trinca superior |
| 110       | 125         |                                 |
| 120       | 131         | Trinca expande pela lateral     |
| 130       | 148         | Trinca totalmente aberta        |
| 140       | 126         |                                 |
| 150       | 120         |                                 |
| 160       | 115         |                                 |
| 170       | 104         |                                 |
| 180       | 100         |                                 |
| 190       | 94          |                                 |
| 200       | 81          |                                 |
| 210       | 70          | Trinca fechada                  |
| 220       | 60          |                                 |
| 230       | 57          |                                 |
| 240       | 53          |                                 |
| 250       | 44          |                                 |
| 260       | 37          |                                 |
| 270       | 32          |                                 |
| 280       | 28          |                                 |
| 290       | 26          |                                 |
| 300       | 24          | Final do 1º ciclo               |

**ENSAIO DE CICLOS TÉRMICOS NA CABEÇA DE PRIEST RAPIDS**

Duração de cada ciclo : 300s

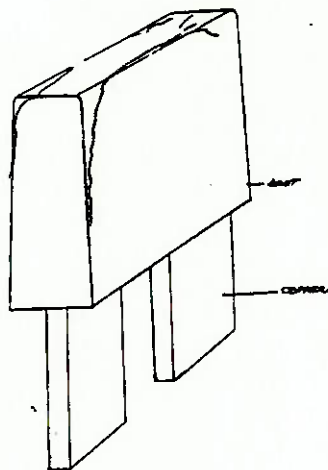
Corpo de prova N° 6

Temperatura final do cobre: 148°C (Programada)

| Tempo (s) | Temperatura | Observações              |
|-----------|-------------|--------------------------|
| 0         | 25          | Começo do 1º ciclo       |
| 10        | 36          |                          |
| 20        | 44          |                          |
| 30        | 55          |                          |
| 40        | 66          |                          |
| 50        | 77          |                          |
| 60        | 94          |                          |
| 70        | 99          |                          |
| 80        | 106         |                          |
| 90        | 114         |                          |
| 100       | 119         |                          |
| 107       | 123         | Aparecimento da trinca   |
| 110       | 126         |                          |
| 120       | 130         |                          |
| 130       | 147         | Trinca totalmente aberta |
| 140       | 125         |                          |
| 150       | 121         |                          |
| 160       | 116         |                          |
| 170       | 103         |                          |
| 180       | 101         |                          |
| 190       | 95          |                          |
| 200       | 80          |                          |
| 210       | 69          | Trinca fechada           |
| 220       | 59          |                          |
| 230       | 58          |                          |
| 240       | 54          |                          |
| 250       | 45          |                          |
| 260       | 36          |                          |
| 270       | 33          |                          |
| 280       | 29          |                          |
| 290       | 25          |                          |
| 300       | 23          | Final do 1º ciclo        |

## **ANEXO B**

**RESULTADO DE ENSAIOS COM QUATRO DIFERENTES  
CURVAS DE AQUECIMENTO. TESTA HIPÓTESE DE  
PROPORCIONALIDADE DE CURVA DE AQUECIMENTO X  
TRINCAS E VISUALIZA SUAS LOCALIZAÇÕES.**

**ENSAIOS DE CURVAS DE AQUECIMENTO**

Esboço das trincas

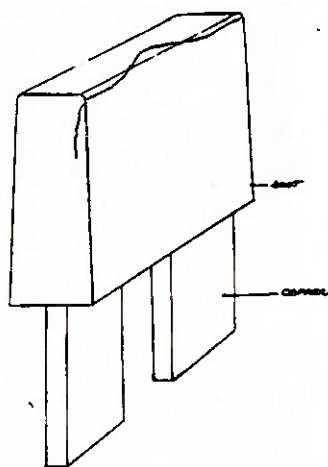
Amostra 1:

Taxa de aquecimento: 45° C / min;

Tempo : 3 min;

número de ciclos até trinca: 1;

trinca a 116° C;



Esboço das trincas

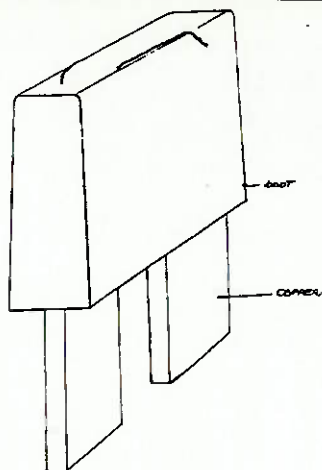
Amostra 2:

Taxa de aquecimento: 22,5° C / min;

Tempo : 6,5 min;

número de ciclos até trinca: 1;

trinca a 123° C;



Esboço das trincas

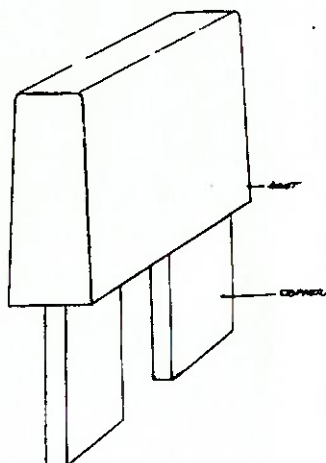
Amostra 3:

Taxa de aquecimento:  $10^{\circ}\text{C} / \text{min}$ ;

Tempo : 15 min;

número de ciclos até trinca: 1;

trinca a  $131^{\circ}\text{C}$ ;



Esboço das trincas

Amostra 4:

Taxa de aquecimento:  $2^{\circ}\text{C} / \text{min}$ ;

Tempo : 70 min;

número de ciclos testados: 15;

não ocorreu a trinca;

## ***APÊNDICE I***

### ***ESPECIFICAÇÃO DA MASSA EPOXI DO ISOLAMENTO***

EPOXY  
FORMULATIONS  
ELECTRICAL  
INSULATION  
SPECIALTY  
PACKAGING

# ASTRO CHEMICAL COMPANY

3 Mill Road, P.O. Box 200, Ballston Lake, New York 12019  
Phones: (518) 399-5338, FAX: (518) 399-8859

## PRODUCT DATA

### ■ TECHNICAL DATA SHEET ■

#### ASTRO SPECIAL 3060

**DESCRIPTION:** Astro Special 3060 is a two component, solventless, room temperature curing, epoxy potting compound designed to exhibit the balance of physical properties necessary for potting larger cross sections. It is specifically engineered to minimize the physical stress on adjacent insulating materials due to thermal expansion. Astro Special 3060 has excellent dielectric properties and has very good compatibility with other insulating materials. It has excellent thermal conductivity to eliminate hot spots.

**MIXING INSTRUCTIONS:** The special pigments in Astro Special 3060 sometimes settle on standing for longer than 60 days. It is suggested that the Part A container be mixed by hand or on a paint shaker, if available, prior to adding Part B curing agent. After insuring the Part A is thoroughly redispersed, the entire contents of the Part B can to the Part A container and mix thoroughly by hand. Do not use a paint shaker to add the Part B.

#### PHYSICAL PROPERTIES:

Mixing Ratio By Weight Ratio A/B = 15/1

|  | Part A | Part B | Mixed |
|--|--------|--------|-------|
|--|--------|--------|-------|

VISCOSITY CPS - Sp. #6,

10 RPM 15-25,000  
20 RPM 13-24,000  
50 RPM 11-21,000

3,500

- Sp. #3 ..... 25-35

DENSITY GRAVITY

1.55-1.65

.98

1.54-1.64

SHELF LIFE - 1 lb.

8 lbs. .... 1 hour

45 minutes

TEMPERATURE - 1 lb.

8 lbs. .... 220°F

290°F

HARDNESS SHORE D

78

DIELECTRIC STRENGTH - 1/8" Thick

430 V/mil

IMPACT STRENGTH - ASTM-256

.87 ft. lbs./in notch

THERMAL CONDUCTIVITY

$3.5 \times 10^{-4}$  Cal/(Cm) (Sec) (Sq Cm) (°C)

Coefficient of THERMAL EXPANSION

$50 \times 10^{-6}$  (In/In/°C)

## MATERIAL SAFETY DATA SHEET

## SECTION I

Astro Chemical Company, Inc.

Mill Road, P.O. Box 200

Elston Lake, New York 12019-0200

Information: (518) 399-5338 or CHEMTREC: (800) 424-9300

EFFECTIVE DATE: 08/04/94

PREPARED BY: Astro Chemical Company - MSDS Dept

PRODUCT NAME: Astro 3060 Part 1

Hazard: Health - 2, Fire - 1, Reactivity - 0

SYNOPSIS OR CHEMICAL NAME: Epichlorohydrin - Bisphenol A Epoxy Resin

## SECTION II HAZARDOUS INGREDIENTS OF MIXTURES

| PRINCIPAL HAZARDOUS COMPONENT(s)             | CAS No.    | WT. % | ACGIH TLV | OSHA PEL |
|----------------------------------------------|------------|-------|-----------|----------|
| Epichlorohydrin - Bisphenol A Epoxy Resin    | 25068-38-6 | 33    | N/E       | N/E      |
| Epichlorohydrin-polyglycol<br>curing product | 26142-30-3 | 17    | N/E       | N/E      |

N/A = Not Established, N/A = Not Applicable, N/D = Not Determined

## SECTION III PHYSICAL DATA

NORMAL BOILING RANGE: &gt; 400°F

VAPOR PRESSURE: .03 mmHg @ 77 Deg C

VAPOR DENSITY: N/D

SOLUBILITY IN WATER: Negligible

APPEARANCE AND ODOR: Opaque liquid with sweet odor.

SPECIFIC GRAVITY: 1.6

VOLATILE BY WEIGHT: N/A

EVAPORATION RATE: N/A

## SECTION IV FIRE AND EXPLOSION HAZARD DATA

FLASH POINT &amp; METHOD: 480 °F (PMCC)

FLAMMABLE LIMITS:

LEL: N/E

UEL: N/E

EXTINGUISHING MEDIA: Water fog, foam, carbon dioxide, dry chemical.

FIRE FIGHTING PROCEDURES: Do not breathe vapors.

FIRE AND EXPLOSION PROCEDURES: Closed containers could rupture under  
extreme heat conditions.

## SECTION V HEALTH HAZARD DATA

TOXICITY DATA: Oral LD50 - 11.4 g/kg (RAT), Dermal LD50 - >20 ml/kg (RBT),  
Inhalation LC50 - No deaths in Sat'd air, 8 HR.

PRIMARY ROUTE OF ENTRY: Skin contact, inhalation.

EFFECTS OF OVEREXPOSURE:

Irritation: Sensitization of the respiratory tract not likely unless resin is  
heated to high or combustion temperatures.

Acute Toxicity: Low acute oral toxicity.

Skin Contact: May cause dermatitis, skin sensitization.

Eye Contact: Moderate to severe irritation. No corneal injury likely.

FIRST AID PROCEDURES:

Inhalation: Remove to fresh air. Consult a physician if necessary.

Ingestion: Do not induce vomiting. Consult a physician.

Skin Contact: Wash immediately with soap and water. If irritation occurs  
consult a physician.Eye Contact: Flush eyes with plenty of water for 15 minutes while holding  
eyelids open. Get medical attention.

1960 Part 1

## -----SECTION VI REACTIVITY DATA-----

BILITY: Stable

COMPATIBILITY (Materials to Avoid): Acids, bases, and amines.

HAZARDOUS DECOMPOSITION PRODUCTS: Carbon monoxide, various aldehydes and irritating products.

HAZARDOUS POLYMERIZATION: Will not occur by itself, but masses of more than (1) pound of product plus an aliphatic amine will cause irreversible polymerization with considerable heat buildup.

CONDITIONS TO AVOID: Acids, bases, and oxidizers

## -----SECTION VII SPILL OR LEAK PROCEDURES-----

STEPS TO BE TAKEN WHEN MATERIAL IS RELEASED OR SPILLED: Scrape up excess and flush area with soap and water.

WASTE DISPOSAL: COMPLY WITH ALL FEDERAL, STATE AND LOCAL REGULATIONS when disposing of waste material.

## -----SECTION VIII SPECIAL PROTECTION INFORMATION-----

RESPIRATORY PROTECTION: Use NIOSH/MSHA approved respirator suitable for organic vapors, if required.

VENTILATION: Good room ventilation usually adequate for most operations

LOCAL EXHAUST: Preferred

SPECIAL: None

MECHANICAL: None

OTHER: None

PROTECTIVE GLOVES: Impervious

EYE PROTECTION: Chemical splash goggles

ADDITIONAL PROTECTIVE EQUIPMENT: As required to prevent personal contact. An emergency eye wash station should be available for use.

## -----SECTION IX SPECIAL PRECAUTIONS-----

HANDLING AND STORAGE PRECAUTIONS: Store in a ventilated area at less than 100°F. Practice good caution and personal cleanliness to avoid skin and eye contact. Avoid breathing vapors of heated material.

ADDITIONAL PRECAUTIONS: Wash thoroughly after use.

## -----SECTION X GOVERNMENTAL INFORMATION-----

3. RIGHT-TO-KNOW INFORMATION: This product does not contain any STATE-R-T-K chemicals.

TITLE III SECTION 313 INFORMATION: This product does not contain any chemicals which are subject to reporting under this regulation.

## MATERIAL SAFETY DATA SHEET

## SECTION I

Astro Chemical Company, Inc.

Mill Road, P.O. Box 1250

Elston Lake, New York 12019-1250

Information: (518) 399-5338 or Chemtrec: (800) 424-9300

EFFECTIVE DATE: 01/01/96

PREPARED BY: Astro Chemical Company - MSDS Dept.

DUCT NAME: Astro 3060 (Part 2)

S: Health - 3, Fire - 1, Reactivity - 0.

MULA OR CHEMICAL NAME: Piperazine Curing Agent

## SECTION II HAZARDOUS INGREDIENTS OF MIXTURES

| PRINCIPAL HAZARDOUS COMPONENT(S) | CAS No.  | % (Wt.) | ACGIH TLV | OSHA PEL |
|----------------------------------|----------|---------|-----------|----------|
| Nitroethylpiperazine             | 140-31-8 | >95     | N/E       | N/E      |

Not Established, N/A - Not Applicable, N/D - Not Determined

## SECTION III PHYSICAL DATA

NORMAL BOILING POINT: 222°C

VAPOR PRESSURE: &lt;.01 mmHg @ 20°C

VAPOR DENSITY: &gt;1 (Air=1)

SOLUBILITY IN WATER: Soluble

APPEARANCE AND ODOR: Liquid with amine odor.

SPECIFIC GRAVITY: .98 @ 25°C

% VOLATILE: N/D

EVAPORATION RATE: &lt;1 (Butyl Acetate = 1)

## SECTION IV FIRE AND EXPLOSION HAZARD DATA

FLASH POINT &amp; METHOD: &gt;200°F (SETA)

FLAMMABLE LIMITS:

LEL: N/E

UEL: N/E

EXTINGUISHING MEDIA: Use Dry Chemical, alcohol foam, water spray, or CO2.

FIRE FIGHTING PROCEDURES: Use full protective clothing and a positive pressure breathing apparatus. Keep container cool with water spray. Prevent environmental contamination, contain runoff water.

FIRE AND EXPLOSION PROCEDURES: Delayed lung damage can be experienced after exposure to combustion products. Nitrogen oxides and nitrogen containing organic compounds may be released upon combustion.

## SECTION V HEALTH HAZARD DATA

TOXICITY DATA: Oral LD50 - 2.15 g/kg (RAT), Dermal LD50 - 880 mg/kg (RBT), Inhalation LC50 - Not determined.

PRIMARY ROUTE(S) OF ENTRY: Inhalation, eye contact, skin contact, and skin absorption.

EFFECTS OF OVEREXPOSURE:

Irritation: Vapors/mists may be corrosive to upper respiratory tract. Repeated exposure can result in lung damage. May cause respiratory tract sensitization.

Ingestion: Not expected to be a relevant route of exposure. However, corrosive may cause severe and permanent damage to mouth, throat, and stomach. May be acutely toxic if swallowed.

Skin Contact: Corrosive to the skin. May cause skin sensitization. May be toxic if absorbed through the skin.

Eye Contact: Corrosive to the eyes and may cause severe damage including blindness. Vapors may be irritating.

CARCINOGENICITY: No components of this product are reported carcinogens by OSHA, or NTP.

Part 2

**EMERGENCY AND FIRST AID PROCEDURES:**

**INHALATION:** Remove victim to fresh air and provide oxygen if breathing is difficult. Give artificial respiration if not breathing. Get medical attention.  
**INGESTION:** DO NOT INDUCE VOMITING. Obtain medical care and hospital treatment immediately. Avoid aspiration of material.  
**SKIN CONTACT:** Immediately remove contaminated clothing. Wipe excess from skin and flush with plenty of water for at least 15 minutes. Use soap if readily available, or follow by washing with soap and water. Get medical attention.  
**EYE CONTACT:** Immediately flush eyes with plenty of water for at least 15 minutes while holding eyelids open. Rinse continuously with water while on way get medical attention.

-----**SECTION VI REACTIVITY DATA**-----

**STABILITY:** Stable

**CONDITIONS AND MATERIALS TO AVOID:** Avoid heat, flame and contact with strong oxidizing agents.

**HAZARDOUS DECOMPOSITION PRODUCTS:** Carbon Monoxide, Carbon Dioxide, Nitrogen oxides, and unidentified organic compounds may be formed during combustion.  
**HAZARDOUS POLYMERIZATION:** Will not occur

-----**SECTION VII SPILL OR LEAK PROCEDURES**-----

**STEPS TO BE TAKEN WHEN MATERIAL IS RELEASED OR SPILLED:** Use proper protective equipment. Ventilate area involved. Take up with an absorbent material and place in non-leaking containers. Seal tightly for proper disposal.  
**WASTE DISPOSAL:** COMPLY WITH ALL FEDERAL, STATE AND LOCAL REGULATIONS when disposing of waste material.

-----**SECTION VIII SPECIAL PROTECTION INFORMATION**-----

**RESPIRATORY PROTECTION:** Use NIOSH approved respiratory protection. For emergencies, a self contained breathing apparatus with pressure demand mode.  
**VENTILATION:** Use adequate general and local exhaust.  
**PROTECTIVE GLOVES:** Neoprene rubber gloves.  
**PROTECTION:** Splash proof chemical goggles  
**RESISTANT PROTECTIVE EQUIPMENT:** As required to prevent skin contact. Eye wash stations should be available for emergency use.

-----**SECTION IX SPECIAL PRECAUTIONS**-----

**HANDLING AND STORAGE PRECAUTIONS:** Store in a cool, dry place with adequate ventilation. Keep away from open flames and high temperatures. Corrosive! causes burns to eye, skin and respiratory tract. May be toxic if absorbed through skin. May cause respiratory tract and skin sensitization. Do not get in eyes, on skin or clothing. Do not breathe vapors or mists.  
**ADDITIONAL PRECAUTIONS:** Wash thoroughly after handling. Avoid skin contact. Avoid breathing vapors.

-----**SECTION X REGULATORY INFORMATION**-----

**RIGHT-TO-KNOW INFORMATION:** Consult your local authorities for regulatory information regarding this product.

**TITLE III SECTION 313 INFORMATION:** This product does not contain any chemicals which are subject to the reporting requirements of this regulation.

## **APÊNDICE II**

### **CAPÍTULO I DO MANUAL DO CONTROLADOR TÉRMICO USADO NA BANCADA DE ENSAIOS**

6 - 5010105  
7 - 10 010105  
8 - 10 010105  
9 - 10 010105  
10 - 10 010105  
13 -

## Series 981/982



Total  
Customer  
Satisfaction

3 Year  
Warranty

### 1/8 DIN Microprocessor-Based Ramping Control

User's Manual



# WATLOW

Watlow Controls, 1241 Bundy Blvd., P.O. Box 5580, Winona, MN 55987-5580, Phone: (507) 454-5300, Fax: (507) 452-4507

W982-MA10-9347

January, 1994

Supersedes:

W988-MA20-9331

\$10.00

Made in the U.S.A.



Printed on Recycled Paper  
10% Postconsumer Waste

# Using the Manual

## How to Use the Manual

Chapter 1, Page 4  
Chapter 2, Page 9  
Chapter 3, Page 19  
Chapter 4, Page 21  
Chapter 5, Page 30  
Chapter 6, Page 35  
Chapter 7, Page 37  
Chapter 8, Page 48  
Chapter 9, Page 54  
Appendix, Page 58

- General Description
- Panel Cutout
- Key Functions
- SEt prompt
- OPEr prompt
- Fcty prompt
- Ramping Profiles
- Tuning
- Glossary
- Applications and Examples
- Menu Map
- Dimensions
- Displays & LEDs
- Input, Output, Global and Communications Menus
- System, PID and Program Menus
- Diagnostics and Calibration Menus
- Ramping Program
- Alarms
- Specifications
- DIP Switch Information
- Power, Inputs, Outputs, Alarms
- Display Key and Loop
- Error Codes
- Model Number

## Notes

This user's manual contains informational notes to alert you to important details. When you see a note icon, look for an explanation in the margin.



**NOTE:**  
Details of a "Note" appear here in the narrow box on the outside of each page.

## Safety Information

This user's manual also has boldface safety information notes to protect both you and your equipment. Please be attentive to them. Here are explanations:



**CAUTION:**  
Details of a "Caution" appear here in the narrow box on the outside of each page.



The Caution symbol (exclamation point) in the wide text column alerts you to a "CAUTION," a safety or functional hazard which could affect your equipment or its performance. A full explanation is in the narrow column on the outside of the page.



The Warning symbol (lightning bolt) in the wide text column alerts you to a "WARNING," a safety hazard which could affect you and the equipment. A full explanation is in the narrow column on the outside of the page.



**WARNING:**  
Details of a "Warning" appear here in the narrow box on the outside of each page.

## Technical Assistance

If you encounter a problem with your Watlow control, review all of your configuration information to verify that your selections are consistent with your application... Inputs, Outputs, Alarms, Limits, etc. If the problem persists after checking the above, you can get technical assistance by dialing: 1-507-454-5300

An Applications Engineer will discuss your application with you.

Please have the following information available when calling:

- Complete model number
- User's Manual
- All configuration information
- Diagnostic menu readings

## Your Feedback

Your comments or suggestions on this manual are welcome, please send them to:  
Technical Writer, Watlow Controls, 1241 Bundy Blvd., P.O. Box 5580, Winona, MN 55987-5580. Phone: 507/454-5300, Fax: 507/452-4507. The Series 981.982 User's Manual is copyrighted by Watlow Winona, Inc., © 1993, with all rights reserved.

blr 0194

# Contents

## Page Item

### Chapter 1

#### Starting Out With the Watlow Series 981/982

- 4 Starting Out With the Watlow Series 981/982
- 5 Menu Overview
- 6 DIP Switch Locations and Functions
- 6 Setting the Hardware Lockout DIP Switch
- 7 External Power Supply DIP Switches
- 8 Input Type DIP Switches

### Chapter 2

#### Install and Wire the Series 981/982

- 9 Panel Cutout
- 9 Dimensions
- 10 Installation Procedure
- 11 Wiring the Series 981/982
- 11 Power Wiring
- 11 Event Input 1 (Ei1) Wiring
- 11 Sensor Installation Guidelines
- 12 Input 1 Wiring
- 13 Input 2 Wiring
- 14 Output 1 Wiring
- 15 Output 2 Wiring
- 16 Output 3 Wiring
- 17 Output 4 Wiring
- 18 System Wiring Example

### Chapter 3

#### Keys and Displays

- 19 Keys and Displays
- 20 Display Key and Loop
- 20 Display Loop Parameters

### Chapter 4

#### The Setup Menus

- 21 Entering the Setup Menus
- 21 Input Menu
- 24 Output Menu
- 28 Global Menu

### Chapter 5

#### The Operation Menus

- 30 The Set Point Menu
- 31 System Prompts
- 32 Pid Menu
- 32 Pid Prompts

### Chapter 6

#### The Factory Menus

- 35 The Factory (Fcty) Menus
- 35 Entering the Fcty Prompt
- 36 Diagnostics Menu

### Chapter 7

#### Programming the Series 981/982

- 37 Program Menu
- 40 Running a Profile
- 40 Resume a Profile
- 41 Run and Pre-Run Menus
- 41 Event Outputs
- 42 Guaranteed Soak Deviation
- 42 Jumploops
- 43 Programming a Ramping Profile
- 44 Running your Profile
- 45 Editing your Profile
- 46 Linking Profiles
- 46 Waitfor Functions

### Chapter 8

#### Operation, Tuning, Alarms and Error Codes

- 48 Autotuning
- 49 Manual tuning
- 51 Alarms
- 53 Error Codes

### Chapter 9

#### Applications

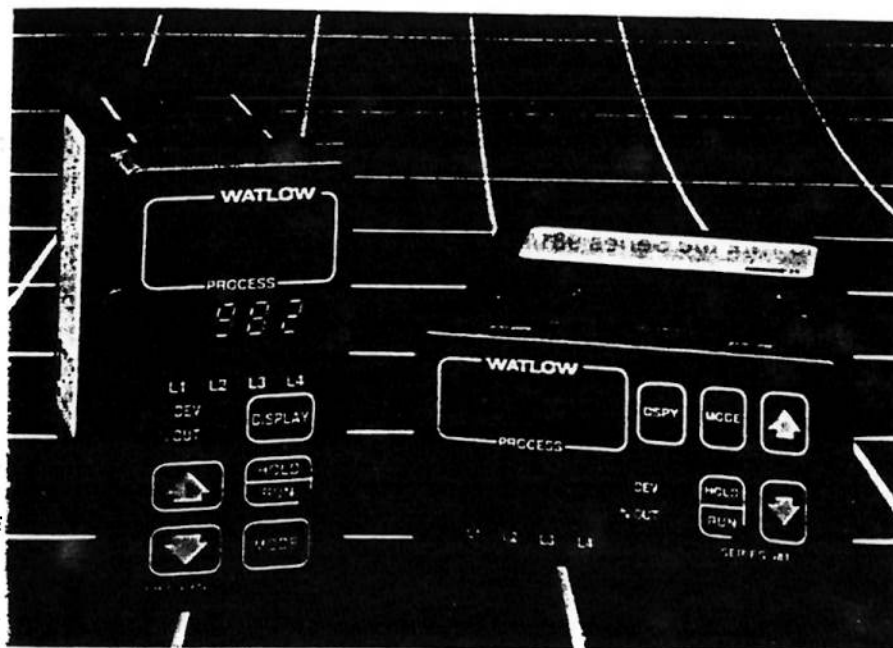
- 54 Burst Fired Zero Cross Output
- 55 Retransmit
- 57 Slidewire

### Appendix

- 58 Glossary
- 60 Index
- 61 Warranty>Returns
- 62 Specifications
- 63 Ordering Information

## Chapter 1

### Starting Out With the Watlow Series 981/982



Watlow's new Series 981/982, an 1/8 DIN microprocessor-based ramping control, is truly an innovation in the control field. The Series 981/982 provides 6 step program capability, with up to 4 files possible.

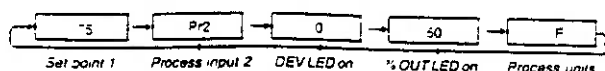
The new control meets a wide variety of needs in the process industries. Its broad range of I/O options allows control of virtually any process variable. In addition to the standard Watlow features, the Series 981/982 has expanded auto-tuning capabilities and increased alarm functionality.

If you are unfamiliar with general control operation, it's a good idea to read through the entire manual. The manual is organized in chronological order with each chapter broken down by wiring, menus, operation and applications. If you understand the concept of process/temperature controls and feel comfortable skipping around through the manual, use the black tabs at the top of each page to quickly scan the pages and find the topic needed.

Page 5 is a great place to start. This map is an overview of all menus and prompts and how to navigate between them. There are three main prompts Setup, Operation and Factory (SEt, OPEr and Fcty). Beneath these prompts there are several menus. The Display Loop can be reached from anywhere using the Display key, and continuously "loops" through the prompts listed. Pages 6 - 8 are on DIP switch location and orientation.

Press **ESC** to exit any menu and reach the Display Loop at any time

## Display Loop (Lower Display)

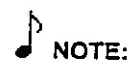
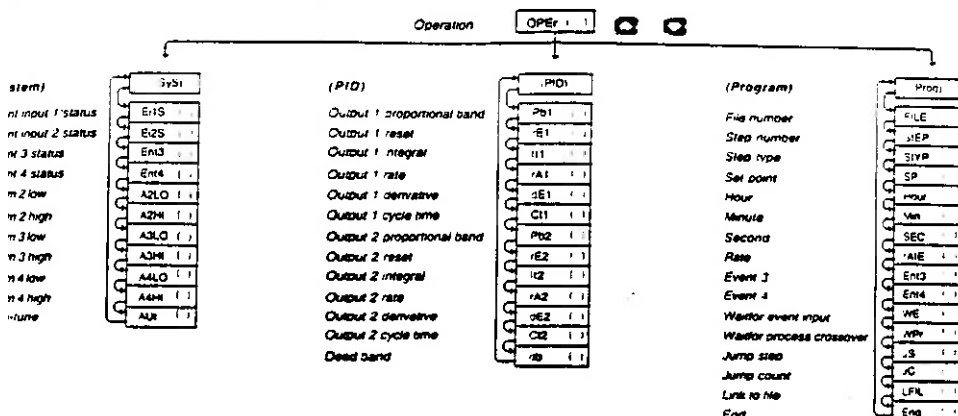


## Menu Overview

Figure 1 -  
The Series 981/982 Map

Press **ENTER** to advance to the OPER prompt.

## Operation Menus



NOTE:

This is a complete listing of all Series 981/982 prompts.

Not all prompts will appear on your control. They are dependent on your configuration and model number.

To navigate:

Press **ESC** to return to the Display Loop from any location and to advance through the Display Loop.

Press **LEFT** or **RIGHT** to move between the menus.

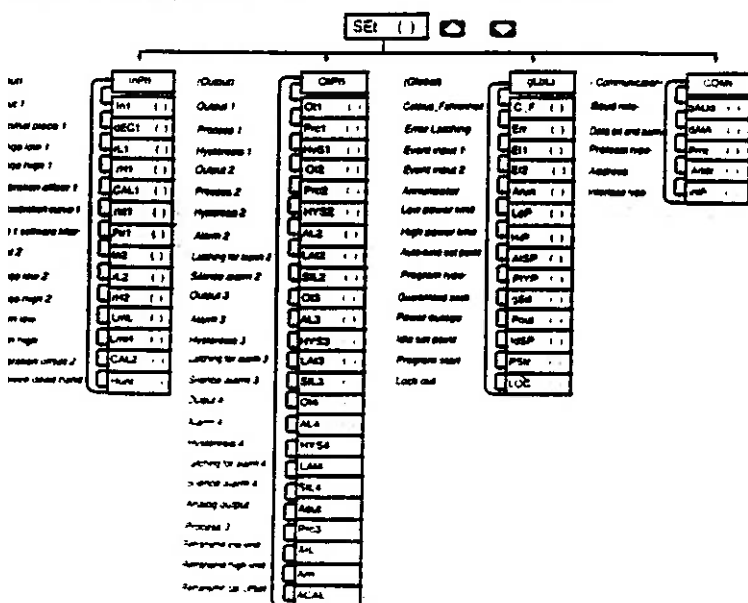
Press **ENTER** to advance through a menu.

Hold **ENTER** while pressing **LEFT** to move backwards through the menus.

Press **LEFT** or **RIGHT** to select prompt values

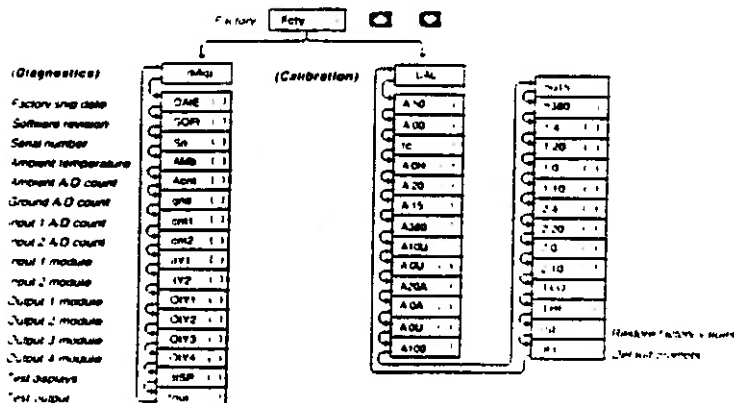
Press **ESC** and **ENTER** for 3 seconds

## Setup Menu



the SEt prompt, press **ESC** and **ENTER** for 3 seconds to enter the Factory menu

## Factory Menu



# DIP Switches

## DIP Switch Locations and Functions

The Series 981/982 has several Dual In-line Package (DIP) Switches inside the control. Depending on your model number, your unit can have as few as one DIP switch or as many as five DIP switches. Use Pages 6 - 8 as a DIP switch reference guide.

To set any DIP switch:

1. Remove the control chassis from the case. Release the two tabs on one side of the bezel, by pressing in firmly on each until you here the tab "snap" when released. Release the two tabs on the opposite side of the control. You may need to rock the bezel back and forth several times to release the chassis.
2. Use the graphics below to locate and identify each DIP switch.
  - Figure 2 is an overview of the output option boards and DIP switch locations.
  - Figure 3 is the hardware lockout DIP switch location
  - Figures 4 - 6 show a PC board cutaway and the settings for each external power supply DIP switch.
  - Figure 7 and 8 are a rear view of the control chassis showing the input DIP switches.

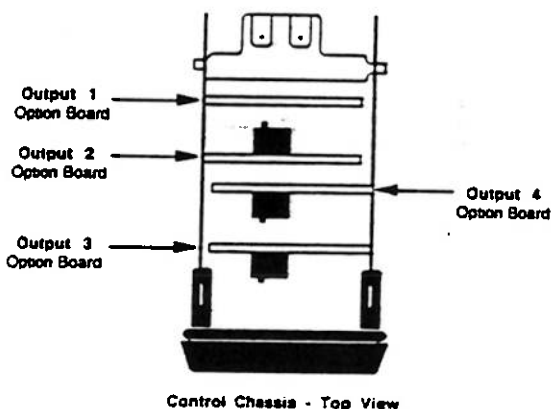


Figure 2 -  
Output Option  
boards

## The Hardware Lockout/Battery Backup DIP Switch

All units are equipped with a DIP switch for hardware lockout of the SEt and Fcty prompt menus, and battery backup of the Run parameters. The location of the board and switch appear below. The switches are clearly numbered, and are labeled on the outside of the board. When Switch #1 ON, battery backup is enabled. When Switch #2 is ON, the menus under the SEt prompt (Input, Output, Global and Communications) and Fcty prompt (Diagnostics and Calibration) cannot be viewed. When the control leaves the factory, both switches are OFF.

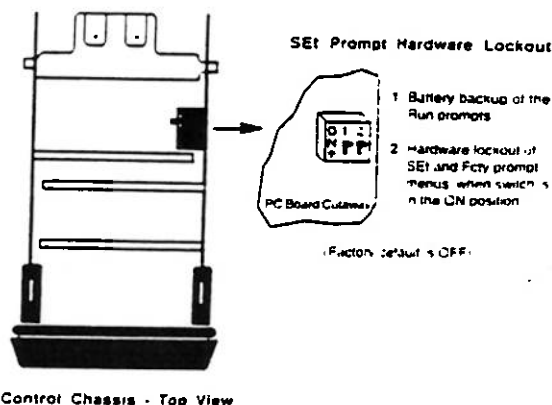


Figure 3 -  
Set Prompt  
Hardware Lockout  
Switch

## External Power Supply DIP Switches

Models equipped with an external signal conditioner power supply (Option "T"), have a DIP switch for selecting the power supply voltage. Output 2, 3 or 4 can be ordered with the external power supply. The location of each board and DIP switch appear below. When the control leaves the factory, both switches are OFF.

Figures 4 - 6 show a PC board cutaway for each DIP switch. See the table to the right for the power supply switch settings. The settings can be used for all three output DIP switches. For other voltages or current ratings contact the factory.

| Voltage/Load Current | S1  | S2  |
|----------------------|-----|-----|
| 5V $\pm$ 5% @ 30mA   | On  | On  |
| 12V $\pm$ 5% @ 30mA  | On  | Off |
| 20V $\pm$ 5% @ 30mA  | Off | Off |

Table 1 -  
Power Supply DIP  
Switch Settings

98 - - - - - I - - - - -

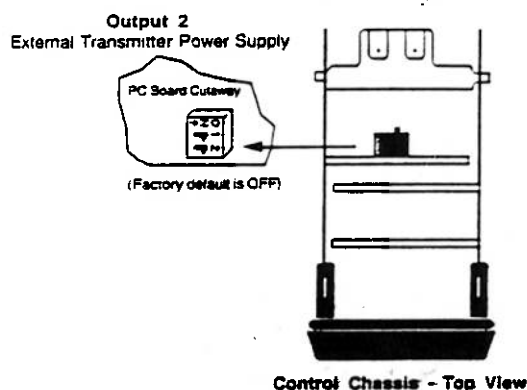


Figure 4 -  
Output 2  
External Signal  
Conditioner  
Power Supply

98 - - - - - I - - - - -

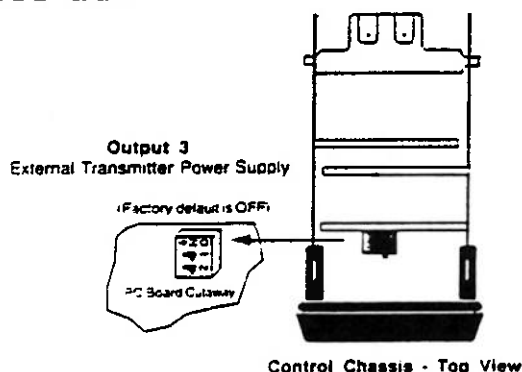


Figure 5 -  
Output 3  
External Signal  
Conditioner  
Power Supply

98 - - - - - I - - - - -

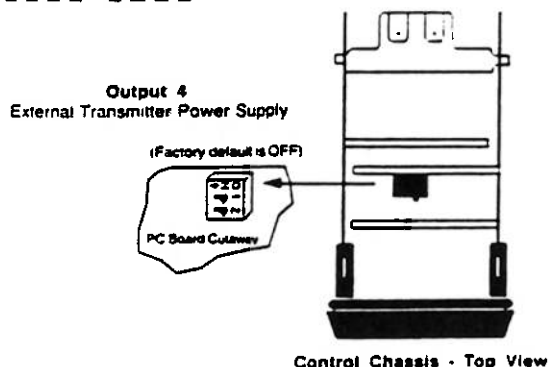


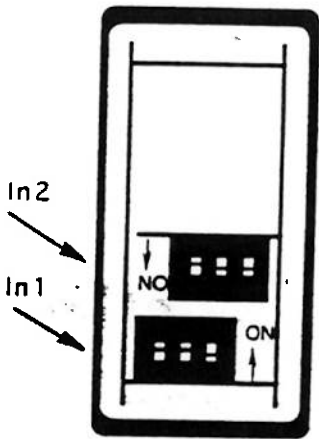
Figure 6 -  
Output 4  
External Signal  
Conditioner  
Power Supply

# DIP Switches

## Universal Signal Input Type DIP Switches

Remove the chassis from the case. Looking at the back of the control, the input #1 (In1) switch is located at the base of the unit, see Figure 7. The appropriate sensor input types will automatically match the DIP switch settings.

If you have model number 98\_\_-1\_\_\_\_\_, there is no In1 DIP switch.



Single Input Unit  
98\_\_-2\_\_\_\_\_



J, K, T, N, C, E, Pt2, D  
Thermocouple Input



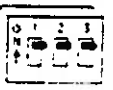
R, S, B  
Thermocouple Input



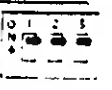
RTD Input



0-50mV or 0-100mV Input



0-5V, 1-5V or 0-10V Input



0-20mA or 4-20mA Input

Figure 7 -  
Input DIP Switch  
Locations

Figure 8 -  
Input DIP Switch  
Settings