

" AUTOMAÇÃO DO RECOZIMENTO DE CHAPAS LAMINADA A FRIO DA USIMINAS (1) "

Ricardo Hector Machain (2)

Eduardo Côrtes Sarmento (3)

Romel Erwin de Souza (4)

R E S U M O

Visando simplificar os controles, aumentar a produtividade e melhorar a qualidade nas bobinas laminadas a frio, a USIMINAS projetou a instalação de um computador de processo nas Linhas de Recozimento.

Devido a quantidade de equipamentos e etapas envolvidos no processo, o projeto tornou-se árduo e difícil, entretanto pelos resultados obtidos nas primeiras experiências, pode-se concluir que os objetivos foram alcançados.

É mostrado no trabalho, o esquema geral para o desenvolvimento do projeto e os resultados dos primeiros testes com os modelos matemáticos para controle dos ciclos de recozimento.

-
- (1) - Trabalho a ser apresentado no Seminário sobre Engenharia de Produção da COLAM. 1.981.
 - (2) - Engenheiro Mecânico Metalurgista, Membro da ABM - Unidade de Metalurgia da Laminação a Frio da USIMINAS; Ipatinga, MG.
 - (3) - Engenheiro Metalurgista, Membro da ABM - Unidade de Pesquisa de Processos de Conformação da USIMINAS; Ipatinga, MG.
 - (4) - Engenheiro Metalurgista, Membro da ABM - Chefe de Seção de Recozimento da USIMINAS; Ipatinga, MG.

1. INTRODUÇÃO.

Dentro dos programas de automação que a USIMINAS vem desenvolvendo, foi proposta a instalação de um computador de processo nas linhas de recozimento.

Com este fim foram criados grupos para o " Software e Hardware " do computador, como também grupos de projeto dos modelos matemáticos que irão controlar os ciclos de recozimento.

Este trabalho foi elaborado pelo grupo de projeto dos modelos matemáticos, mostrando os esquemas gerais realizados para o desenvolvimento destes modelos, e alguns resultados obtidos nas primeiras experiências realizadas para a definição dos mesmos.

Tendo sido um modelo bem aceito pelas unidades de programação, produção e controle, foi solicitado patente de invenção ao INPI com o nome de "Processo de Controle Total para o Recozimento de Bobinas", Sob Nº PI-8103335.

2. DESENVOLVIMENTO.

2.1. Generalidades

A USIMINAS possui hoje 196 bases de recozimento com capacidade de produzir 100.000 t/mês de chapas laminadas a frio. Estas 196 bases encontram-se divididas em cinco áreas diferentes, cada uma com características de equipamentos e de capacidade distintas.

Inicialmente o sistema de automação será instalado em 54 bases, pretendendo-se logo extê-lo aos outros poços.

O computador permitirá atingir o grau máximo de automação possível com os equipamentos existentes. Suas principais funções serão:

- Otimização da forma de carga;
- Otimização dos tempos de aquecimento e resfriamento;
- Otimização da transferência de fornos e campâmulas;
- Controle do ciclo de aquecimento e resfriamento;
- Controle das servoválvulas através do sistema PID;
- Controle das anomalias e registro das mesmas em relatórios de eventos;
- Detecção de anomalias operacionais;
- Controle da produção.

Nas 54 bases controladas por computador serão produzidas chapas destinadas a estampagem média e profunda e qualidade comercial, com diversos graus de qualidade superficial. Partiu-se do princípio de que o modelo deveria servir para simplificar os ciclos atualmente utilizados, diminuir custos, melhorar produtividade e principalmente melhorar a qualidade.

2.2. Esquema de Trabalho

Na figura I é mostrado o esquema geral de trabalho para desenvolvimento dos modelos matemáticos.

- Análise dos modelos de outras Usinas.

Os modelos matemáticos desenvolvidos em outras usinas de países tais como Japão, Estados Unidos ou Alemanha, são apresentados em publicações mostrando apenas suas generalidades sendo que, o projeto propriamente dito é mantido em sigilo.

Tendo como base essas publicações foram analisados 1 modelo Americano, 3 Japoneses e 1 alemão.

Em termos gerais esses modelos trabalham controlando o ciclo através de um termopar que mede a temperatura do gás, ou também de um termopar no forno e outro na base ou ainda de um somente medindo a temperatura do forno, utilizando também o tempo como elemento de controle.

Quase todos os modelos possuem também fatores de correção em função da forma da carga.

Observando-se as vantagens e desvantagens de cada um destes modelos, e tendo em vista que dificilmente os mesmos poderiam ser adaptados inteiramente às nossas instalações, decidiu-se desenvolver um modelo próprio.

- Estudo Estatístico de Dados Operacionais.

Para se conhecer com precisão suficiente o comportamento dos equipamentos a fim de obter a produção e a qualidade desejada, foram realizados levantamentos históricos operacionais e traçadas várias correlações entre variáveis.

Foram analisados mais de 1.000 registros de operação e deles retiradas as seguintes informações:

- Temperatura da base e do topo atingida no encharque;
- Velocidade de aquecimento do forno;
- Velocidade de aquecimento do termopar da base;
- Temperatura da base e do topo no descarregamento;
- Tempo de aquecimento até o início de encharque;
- Tempo de resfriamento natural;
- Tempo de resfriamento forçado;
- Forma da carga: * Espessura, diâmetro, largura e peso das bobinas.
* Dimensões da bobina da base.
* Altura da carga.
- Posição dos termopares;
- Anomalias operacionais tais como corte de COG ou corte de energia.

Todas essas variáveis foram analisadas cuidadosamente e foram traçadas através de um programa de computador, mais de 20 curvas regressivas de correlação entre variáveis.

Assim foram detectados fatores importantes dos quais podemos mencionar:

- Influência da altura da carga na obtenção e homogeneidade de temperaturas (Figura II);
- Influência do tamanho da bobina da base na obtenção de temperaturas (Figura III);
- Influência da posição e do estado dos termopares na obtenção das temperaturas e nos tempos de encharque;
- Influência da velocidade de aquecimento na homogeneidade de temperaturas;
- Influência do tempo de resfriamento natural no tempo total de resfriamento (Figura IV).

Foram traçadas também curvas de correlação entre o peso da carga e os tempos de aquecimento e resfriamento, separando por grupos de qualidade, dimensões das bobinas ou forma das cargas. (Figuras V e VI).

Como resultado das análises concluiu-se que o controle dos ciclos pelos termopares da base e do topo (como vem sendo utilizado atualmente) provoca uma série de incertezas devido às variações de temperaturas que ocorrem por diversos motivos.

Finalmente optou-se por projetar um ciclo de controle de aquecimento e resfriamento através do tempo, utilizando os termopares do forno e da base só para controle das servoválvulas.

Entretanto para poder trabalhar com tempos calculados previamente, foi necessário conhecer as anomalias operacionais tais como corte de COG ou corte de energia e os efeitos das mesmas nos resultados finais de produção de qualidade.

Assim sendo, foi analisado o comportamento das curvas de aquecimento e resfriamento durante as paradas imprevistas, e finalmente foram determinados os padrões de atuação para cada caso.

- Estudo do Ponto Frio da Carga.

Para se realizar um estudo completo do que acontece dentro da carga durante o ciclo de recozimento, seria necessário fazer um balanço térmico, isto é, conhecer os coeficientes de transferência de calor por radiação, condu-

ção e convecção o achar um modelo de transmissão de calor.

Entretanto para um estudo dessa natureza necessita-se de elementos tais como anemômetros, para medir a vazão nas diferentes partes da carga, e registradores de temperatura de muitos pontos e alta precisão. Como não são disponíveis esses elementos, optou-se por realizar esse balanço térmico num futuro próximo como checagem das equações determinadas pelo grupo dos modelos.

Entretanto, utilizou-se um registrador de temperaturas de seis pontos para conhecer os gradientes existentes entre pontos quentes e frios das cargas (figura VII).

Através destas medições detectou-se que em alguns casos o ponto quente, localizado nas espiras externas das bobinas próximas da região dos queimadores, ultrapassava os 723°C , provocando com isso superaquecimento dessa região. Ainda nesse estudo observou-se que para algumas cargas, o gradiente de temperatura entre o ponto quente e o ponto frio era demasiadamente elevado (figura VII.a).

É sabido que em outras usinas foi minimizado esse problema com a utilização de abafadores de dupla parede. Entretanto a USIMINAS não possui tal equipamento, logo foi necessário optar-se por modificações no padrão de controle para evitar esses casos.

- Otimização da Forma da Carga.

Diversas publicações encontradas comentam a respeito da influência da forma da carga na obtenção e homogeneidade de temperaturas entre os diferentes pontos da mesma.

Alguns autores determinam o índice de cilindridade através da relação existente entre a forma real da carga e o tamanho do abafador.

Também diversas usinas estudaram a influência da largura e diâmetro das bobinas na obtenção das temperaturas desejadas.

A espessura tem pouca influência na distribuição de temperaturas, porém influência nas propriedades mecânicas obtidas e na qualidade superficial com respeito a defeitos tais como colamento ou depósito de carbono.

Devido a isso, foram determinados padrões de carregamento em função da largura, diâmetro e espessura das bobinas, além é claro, da qualidade.

Para saber-se o que aconteceria com os índices de produção e estocagem com a introdução dessas variáveis, estão sendo realizadas simulações de operação do recozimento através de programas de computador.

Nesse estudo de simulação utilizou-se o sistema denominado XLSIM (Experimentation Cellular Simulation), que é composto de uma série de rotinas na

linguagem Fortram IV que simplificam a articulação de conceitos e a execução de tarefas comuns em simulação.

Além das rotinas comuns em qualquer simulação, cada modelo específico compõe de uma programação particular a cada estudo. Assim sendo foram programadas a inicialização do sistema, os eventos e as atividades condicionais.

Foram realizados aproximadamente 75 testes do modelo, utilizando 287 K BYTES de memória no computador IBM 370 modelo 148. A fase de análise começou em março de 1.979 e os testes com o modelo em novembro de 1.979.

- Conhecimento de Informações Históricas de Qualidade.

Um dos problemas do controle do recozimento é conseguir produzir materiais isentos de defeitos superficiais, e conferir ao material as propriedades mecânicas exigidas para determinada qualidade.

Em função desses objetivos o grupo tentou conhecer a "história" dos defeitos, correlacioná-los aos dados operacionais e finalmente atuar no sentido de minimizá-los.

Neste campo atuou-se:

- Na temperatura de descarregamento e nos tempos de resfriamento visando diminuir o defeito "cor de revenido";
- No controle de aquecimento tentando evitar superaquecimento das espiras externas e também procurando conseguir melhores temperaturas no ponto frio da carga;
- Na forma da carga com o objetivo de homogeneizar qualidades;
- No momento adequado para fechamento da exaustão do gás de proteção.

- Projeto dos Modelos.

Determinadas as variáveis que influenciam na obtenção das condições necessárias para recozer os materiais e definido o tipo de modelo que seria adotado, começou-se a projetar os coeficientes das equações.

Para obtenção desses coeficientes foram usados dados estatísticos, as correlações entre variáveis, e os estudos dos pontos frios. No caso de resfriamento, baseado em dados históricos, procurou-se determinar a temperatura ideal para evitar o defeito cor de revenido, e otimizou-se a utilização das câmpulas de resfriamento para as quais foi definido um tempo ótimo para colocação das mesmas.

Finalmente, uma vez determinados os coeficientes, foram projetadas várias equações de controle e programadas experiências para testar qual dos modelos se comportaria melhor quanto aos resultados de qualidade e produtividade.

Teste dos Modelos.

Até o momento da elaboração do presente trabalho foram testados os modelos de aquecimento e resfriamento para as qualidades estampagem profunda, e de aquecimento para estampagem média e qualidade comercial.

Foram experimentados modelos com temperaturas variando desde 770°C até 810°C no termopar do forno, e de 650°C até 720°C no termopar da base, e também cinco modelos utilizando tempos de aquecimento diferentes.

Na tabela I pode-se observar os resultados obtidos pelos modelos comparados com os dados de rotina, e a tabela II os dados de propriedades mecânicas. (Médias de todas as bobinas recozidas).

Da análise dessas tabelas fica claro que o modelo que melhor se comportou foi o modelo nº 5, portanto o escolhido para o controle do recozimento por computador.

Com relação ao controle do resfriamento foi confirmado o único modelo testado cujos resultados operacionais podem ser observados na tabela III.

Com relação a problemas tais como defeito "cor de revenido", os resultados foram excelentes.

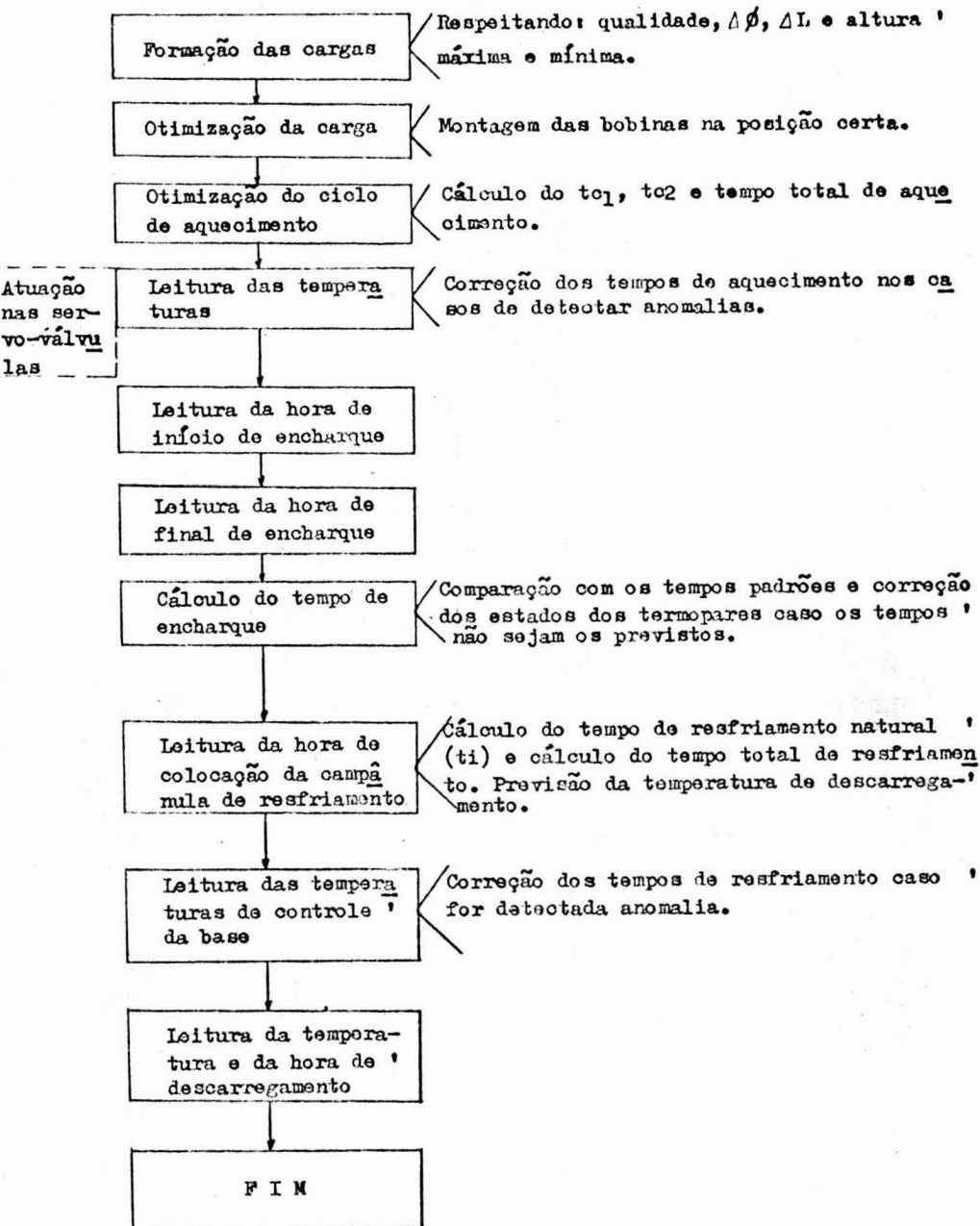
Projeto dos Modelos Definitivos.

Baseado nos resultados das experiências foram padronizados os modelos cujos esquemas gerais são mostrados no quadro IV (modelo de aquecimento) e no quadro V (modelo de resfriamento).

Foram criados também fatores de correção das equações, prevendo determinados casos específicos como rugosidade baixa, tensão de bobinamento elevada, bobinamento irregular, material processado na limpeza eletrolítica, etc.

Outros fatores de correção foram criados para os casos de anomalias operacionais tais como corte de energia, corte de COG, defeito no computador, etc.

2.3. Fluxograma de Operação do Modelo



tc_1 = Temperatura do forno

tc_2 = Temperatura da base

t_i = Tempo de resfriamento natural

ϕ = Diâmetro das bobinas

L = Largura das bobinas.

Atuação dos Termopares.

Até a entrada em operação destes modelos, os ciclos estão sendo controlados através do tempo de encharque, isto é, através do tempo contado desde o momento em que o termopar da base ou do topo da carga atingir a temperatura visada, adicionando a esse tempo de encharque, um período extra, função da diferença entre os termopares.

A partir da introdução deste modelo, os tempos de aquecimento e resfriamento serão calculados previamente podendo portanto acontecer diferentes tempos de encharque, dependendo dos estados dos termopares, das dimensões das cargas, ou de outras variáveis.

Pretende-se portanto que para cargas com igual tempo total de aquecimento, o calor fornecido seja o mesmo, resultando com isto uma qualidade final semelhante.

Assim a função dos termopares do forno e da base (não existirá mais termopar no topo) estará restringida ao controle das servo-válvulas e os valores de encharque e descarregamento serão apenas anotados para se conhecer o estado dos termopares e para detecção de outros problemas menos frequentes como por exemplo regulagem dos fornos.

Atuação dos termopares será da seguinte maneira:

- Termopar do forno:

O forno aquecerá livremente até este termopar indicar que atingiu a temperatura visada e a partir desse momento irá comandar juntamente com o termopar da base o fechamento ou abertura das servo-válvulas atuando através do sistema P.I.D, de maneira a não permitir a queda de temperatura como também aquecimento acima do visado.

- Termopar da base:

A temperatura do termopar da base será lida continuamente, contribuindo junto ao termopar do forno no controle das servo-válvulas e atuando também através do sistema P.I.D de maneira a não permitir a queda de temperatura durante o encharque.

3. CONCLUSÃO.

A partir dos resultados que vem sendo obtidos com os testes dos modelos pode-se prever que as seguintes melhorias poderão ser alcançadas:

- Maior precisão na previsão da produção devido ao conhecimento antecipado dos tempos de processamento para cada qualidade;
- Otimização do uso de fornos e bases devido ao controle de transferência de fornos;
- Aumento da vida útil das campâmulas de resfriamento devido a otimização de utilização das mesmas;
- Diminuição dos riscos de acidentes e redução dos custos em função da não utilização do termopar no topo da carga;
- Detecção mais rápida de problemas tais como erro de registro dos termopares, regulagem de fornos, etc.;
- Homogeneidade das propriedades mecânicas do material processado e diminuição do problema de super aquecimento nas espiras externas das bobinas.

Finalmente podemos acrescentar que, devido a maneira com que foram projetadas as equações, os coeficientes das mesmas poderão ser corrigidos no caso de alterações na qualidade das bobinas a serem recozidas ou de exigências de produtividade.

AGRADECIMENTOS.

Agradecemos a colaboração prestada pela Unidade de Pesquisa Operacional da USIMINAS que permitiu uma análise mais rápida dos dados estatísticos operacionais e a otimização da forma da carga.

BIBLIOGRAFIA.

- 1 - Lee. Wilson - "Sistema".
- 2 - C. Brun et Bouchery - "Le Recuit".
- 3 - Richtlinien Fur das Gluhen Von Bundstapeln
"Orientação para o recozimento de lotes de bobinas".

| | CARGA MÉDIA (t) | t/h DE AQUECIMENTO |
|----------|--------------------|-----------------------|
| Rotina | 74,81 | 1,64 |
| Modelo 1 | 76,07 | 1,68 |
| Modelo 2 | 78,00 | 1,53 |
| Modelo 3 | 78,69 | 1,59 |
| Modelo 4 | 78,30 | 1,56 |
| Modelo 5 | 77,66 | 1,63 |

Tabela I - Resultados operacionais.

(Material para estampagem profunda)

| | Rotina | Modelo 1 | Modelo 2 | Modelo 3 | Modelo 4 | Modelo 5 |
|--------------------------------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|
| LE Kg/mm ² | 18,06 | 18,60 | 17,90 | 17,90 | 18,00 | 17,30 |
| Along. % ABNT-586 | 40,60 | 40,00 | 40,90 | 40,40 | 40,40 | 42,10 |
| Emb. Erichsen Esp. = 0,90mm | 10,67 | 10,43 | 10,85 | 10,83 | 10,65 | 10,97 |

Tabela II - Resultado de propriedades mecânicas.

(Material para estampagem profunda)

| | t/h DE RESFRIAMENTO (PCF) | t/h DE RESFRIAMENTO (QCF) |
|-------------|------------------------------|------------------------------|
| Rotina | 1,65 | 1,92 |
| Experiência | 1,66 | 1,94 |

Tabela III - Resultados operacionais - Resfriamento.

(Material para estampagem profunda)

| QUALIDADE | ESPESSURA (mm) | LARGURA (mm) | ENCHARQUE | | TEMPO TOTAL DE AQUECIMENTO (h) |
|-----------|-------------------|-----------------|------------|--------|--------------------------------------|
| | | | tc_1 | tc_2 | |
| QC | ≤ 0,80 | ≤ 800 | θ_1 | T_1 | $a_1 P + b_1$ |
| | | 800 ~ 1250 | θ_1 | T_1 | $a_2 P + b_2$ |
| | | ≥ 1250 | θ_1 | T_1 | $a_3 P + b_3$ |
| | ≥ 0,80 | ≤ 800 | θ_2 | T_2 | $a_4 P + b_4$ |
| | | 800 ~ 1250 | θ_2 | T_2 | $a_5 P + b_5$ |
| | | ≥ 1250 | θ_2 | T_2 | $a_6 P + b_6$ |
| EP | ≤ 0,80 | ≤ 800 | θ_3 | T_3 | $a_7 P + b_7$ |
| | | 800 ~ 1250 | θ_3 | T_3 | $a_8 P + b_8$ |
| | | ≥ 1250 | θ_3 | T_3 | $a_9 P + b_9$ |
| | ≥ 0,80 | ≤ 800 | θ_4 | T_4 | $a_{10} P + b_{10}$ |
| | | 800 ~ 1250 | θ_4 | T_4 | $a_{11} P + b_{11}$ |
| | | ≥ 1250 | θ_4 | T_4 | $a_{12} P + b_{12}$ |

Tabela IV - Padrão de controle de aquecimento.

tc_1 = Temperatura do forno

tc_2 = Temperatura da base

P = Peso total da carga

| QUALIDADE | SUPERFÍCIE | LARGURA (mm) | TEMPO TOTAL DE RESFRIAMENTO(h) | TEMPERATURA DE DESCARREGAMENTO |
|-----------|------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| QC | PQF | ≤ 1100 | $a_1 P + b_1 t_1 + c_1$ | T'_1 |
| | | ≥ 1100 | $a_2 P + b_2 t_1 + c_2$ | T'_2 |
| | QCF | ≤ 1100 | $a_3 P + b_3 t_1 + c_3$ | T'_3 |
| | | ≥ 1100 | $a_4 P + b_4 t_1 + c_4$ | T'_4 |
| EP | PQF | ≤ 1100 | $a_5 P + b_5 t_1 + c_5$ | T'_5 |
| | | ≥ 1100 | $a_6 P + b_6 t_1 + c_6$ | T'_6 |
| | QCF | ≤ 1100 | $a_7 P + b_7 t_1 + c_7$ | T'_7 |
| | | ≥ 1100 | $a_8 P + b_8 t_1 + c_8$ | T'_8 |

Tabela V - Padrão de resfriamento.

P = Peso total da carga

T'_i = Tempo de resfriamento natural

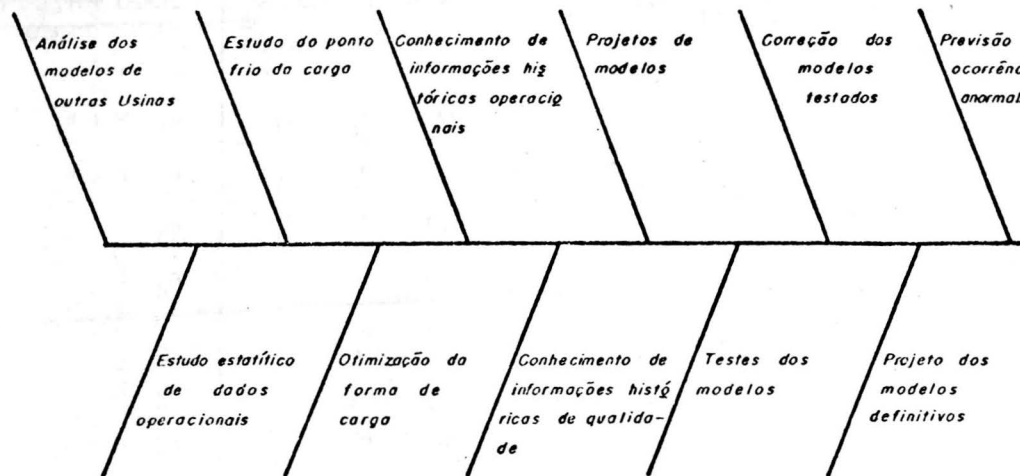


FIG. I - ESQUEMA GERAL DO PROJETO DOS MODELOS.

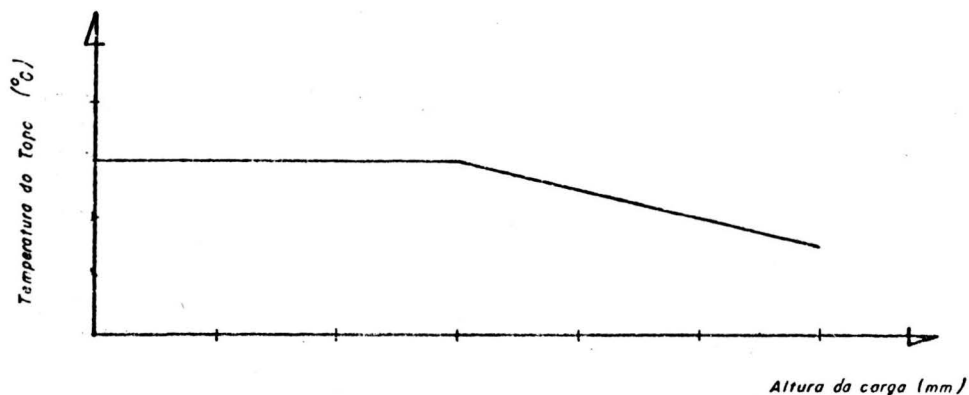


FIG. II - INFLUÊNCIA DA ALTURA DA CARGA NA TEMPERATURA ATINGIDA NO TOPO

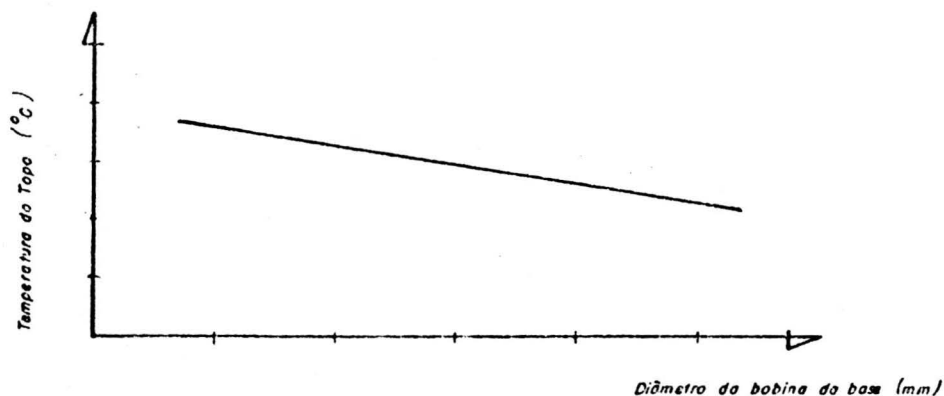
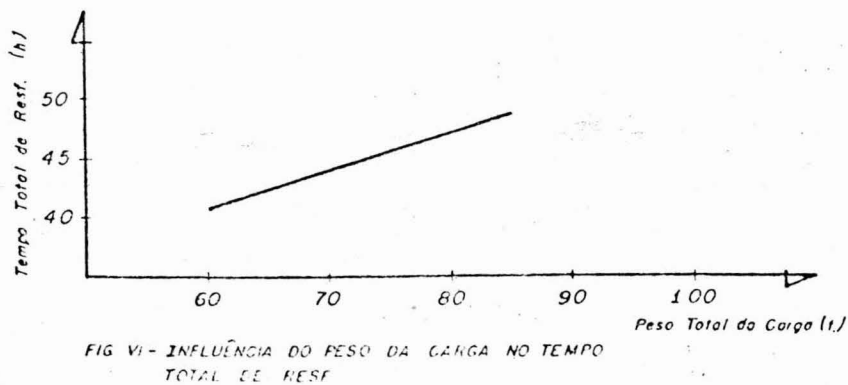
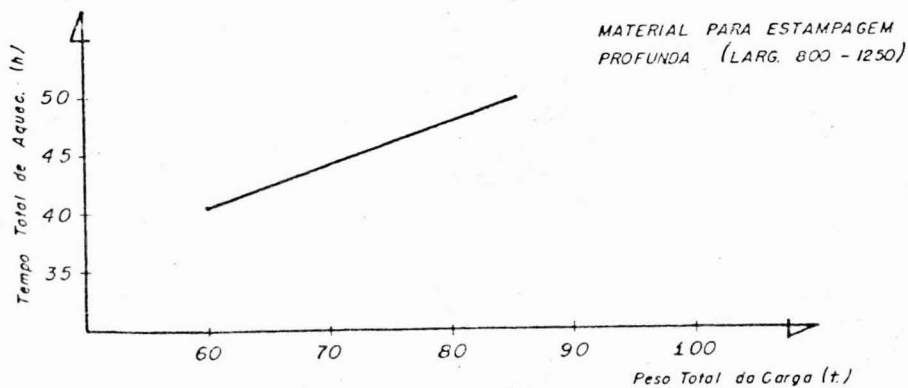
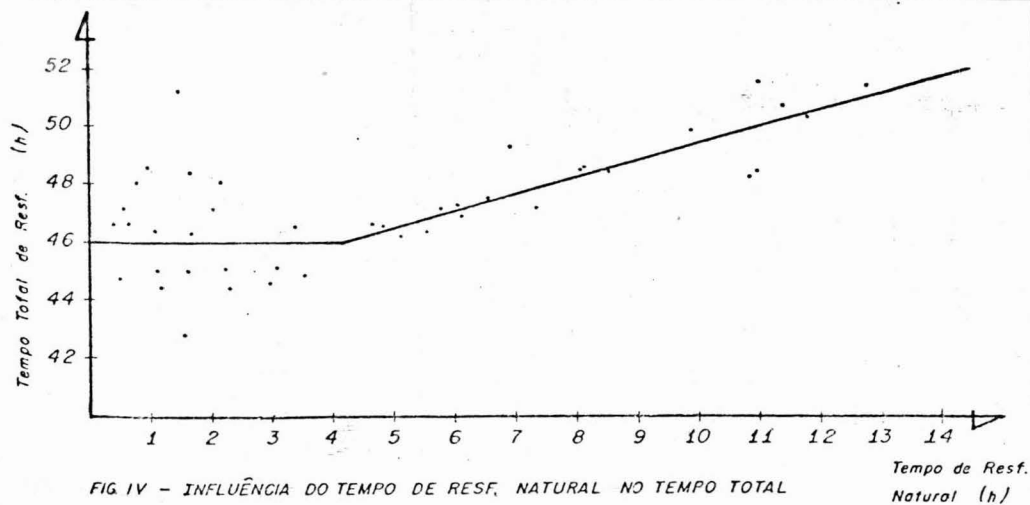


FIG. III - INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DA BOBINA DA BASE NA TEMPERATURA ATINGIDA NO TOPO DA CARGA



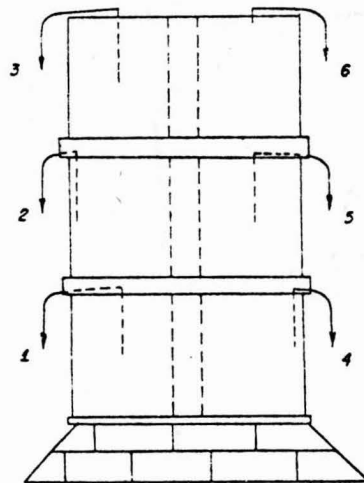
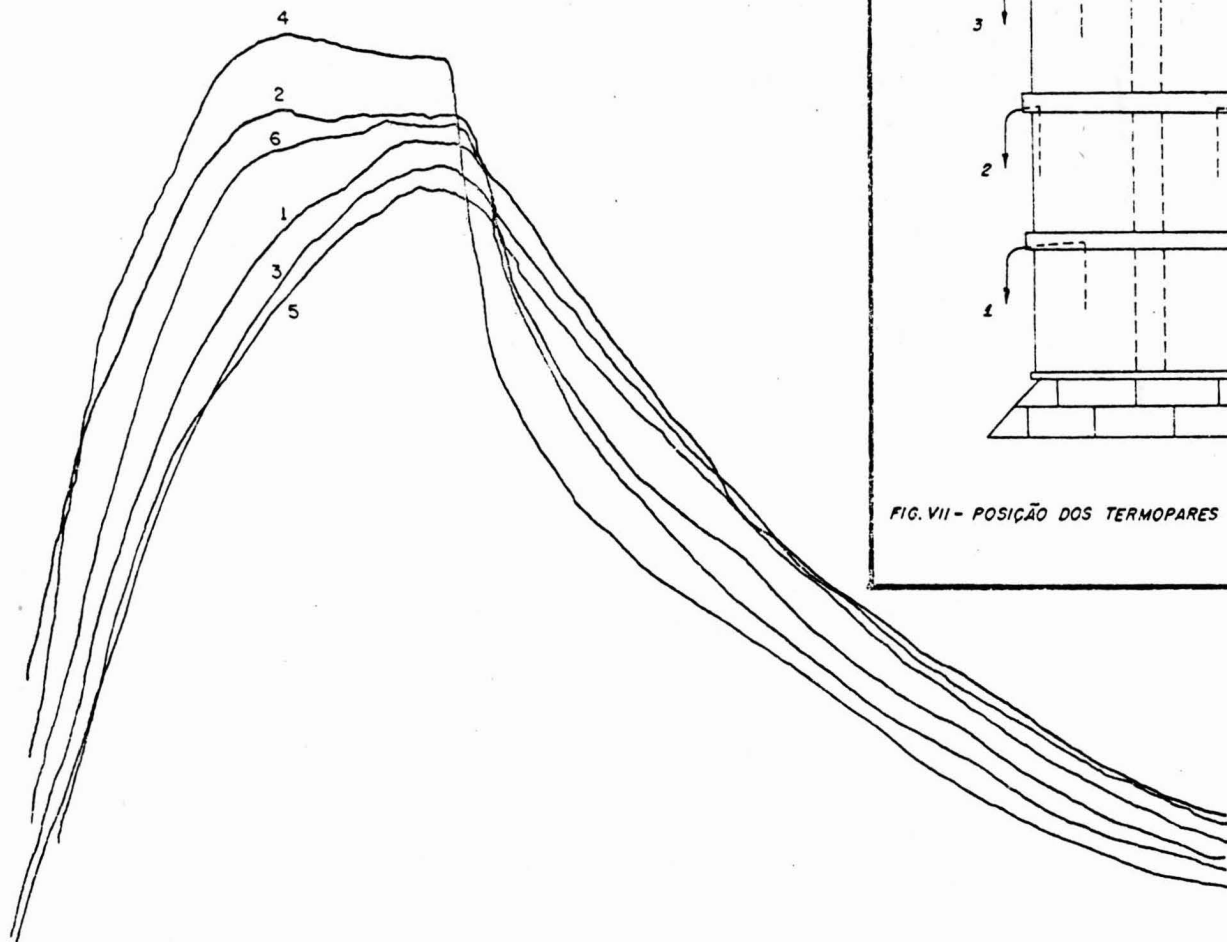


FIG. VII - POSIÇÃO DOS TERMOPARES PARA O ESTUDO DOS