

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO MECÂNICO

MODELO MATEMÁTICO DE TROCA TÉRMICA PARA O PROCESSO
DE "POWDER COATING"
ANÁLISE NOS REGIMES TRANSITÓRIO E PERMANENTE

AUTOR: FERNANDO DA MOTA LOPES JÚNIOR
ORIENTADOR: PROF. DR. MARCOS DE MATTOS PIMENTA

TF-87
L 881-m

AGRADECIMENTOS

A realização deste estudo apenas tornou-se viável com a utilização de recursos do CPqD da Divisão Cabos da Pirelli Brasileira.

Todos os dados necessários à configuração do modelo foram transmitidos a mim pelo Engenheiro Homero Jorge Mazzola, meu instrutor de estágio e encarregado do desenvolvimento do equipamento.

Por se tratar de um processo exclusivo da Pirelli no mercado nacional, a inclusão de parte das informações sobre o processo neste relatório apenas foi possível com a autorização do Engenheiro Mauro Gomes Vidal, responsável pela gerência do departamento que projeta e constrói protótipos para o CPqD e outras unidades da empresa.

A estas pessoas manifesto a minha gratidão pela colaboração e pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais

SUMÁRIO

Este trabalho foi desenvolvido no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Divisão Cabos do Grupo Pirelli, durante o estágio que realizei no mesmo no ano de 1987.

Neste período encontrava-se em teste de produção uma linha de fabricação de fios esmaltados pelo processo denominado "POWDER COATING". Através deste processo reveste-se fios de alumínio ou cobre com seção retangular, utilizados na produção de magnetos e transformadores. O material de revestimento dos fios (em pó) é depositado sobre o fio metálico nu eletrostaticamente. Após esta fase o fio entra em um conjunto de estufas para que ocorra a cura do material isolante através de um processo térmico.

O conjunto de estufas em questão foi projetado pelo departamento em que estive alocado, com cálculos térmicos simplificados e estimando-se porcentagens de perda.

Havia a necessidade de se recalcular de uma maneira mais precisa as potências envolvidas no processo e a curva de aquecimento do núcleo metálico ao longo do comprimento da estufa, permitindo simulações de operação fora do equipamento.

Com estes dados teríamos condições de determinar qual a real capacidade de produção do sistema projetado e avaliar a sua eficiência.

Cabe justificar que o modelo foi particularizado por quatro motivos:

- testar a validade do modelo com a coleta de dados experimentais medidos no equipamento em testes. Através destes dados poderíamos avaliar a precisão dos resultados e aferir o modelo semi-empírico, de modo que reproduzisse de maneira fiel a realidade;

- testar dados de fornecedores sobre produtos utilizados na construção do equipamento, principalmente a isolação;

- verificar o projeto e a eficiência do conjunto de estufas em fase de testes;

- como a quantidade de variáveis envolvidas em um modelo genérico seria muito grande, resolveu-se impor a geometria ao conjunto, particularizando o modelo para a simulação dos módulos de estufa existentes.

Embora seja imposta uma geometria inicial, isto não invalida o uso do modelo para outras condições, desde que feitas as devidas alterações.

O modelo final integra um modelo em regime permanente, para o cálculo das condições da seção da estufa, e um modelo em regime transitório, que determina a evolução de temperaturas do fio esmaltado.

Através deste desenvolvimento pretende-se adquirir elementos que auxiliem no projeto e na operação de futuras instalações com características semelhantes.

ÍNDICE

1. DESCRIÇÃO DO PROCESSO	1
2. O EQUIPAMENTO	5
3. O MODELO	9
3.1 MODELAGEM DA ESTUFA	10
3.1.1 EQUAÇÕES	14
3.1.2 ANÁLISE DOS FATORES DE FORMA	18
3.1.3 SISTEMA RESULTANTE	21
3.1.4 RESOLUÇÃO DO SISTEMA	25
3.1.5 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	26
3.2 MÉTODO DE DIFERENÇAS FINITAS APLICADO AO FIO	34
3.2.1 EQUAÇÕES	35
3.2.2 ANÁLISE DOS FATORES DE FORMA	36
3.2.3 SISTEMA RESULTANTE	39
3.2.4 ANÁLISE DO INTERVALO DE CONVERGÊNCIA	41
3.2.5 RESOLUÇÃO DO SISTEMA	43
3.2.6 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	44
3.3 INCLUSÃO DO FIO AO MODELO DA ESTUFA	47
3.3.1 EQUAÇÕES	48
3.3.2 RESOLUÇÃO DO SISTEMA	50
3.4 INTEGRAÇÃO DOS MODELOS	53
3.5 INCLUSÃO DA PELÍCULA DE ESMALTE NO CÁLCULO DO TRANSITÓRIO DO FIO	54
3.5.1 EQUAÇÕES	55
3.5.2 ANÁLISE DO INTERVALO DE CONVERGÊNCIA	57
3.5.3 RESOLUÇÃO DO SISTEMA	59

3.5.4 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	59
4. SIMULAÇÕES: TABELAS E GRÁFICOS	61
4.1 TABELAS	62
4.2 GRÁFICOS	65
5. CONSTATAÇÕES EXPERIMENTAIS E ANÁLISE DO MODELO	67
5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	67
5.2 CONCLUSÕES E PRINCIPAIS RESULTADOS	69
6. BIBLIOGRAFIA	71
7. ANEXOS	72
7.1 PROGRAMAS	72
7.2 SIMULAÇÕES	85

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1 ESQUEMA DA LINHA DE "POWDER COATING"	4
2.1 CORTE DA SEÇÃO TRANSVERSAL DE UM MÓDULO	8
3.1.1 ESQUEMA DE TROCAS TÉRMICAS PARA UMA SEÇÃO	28
3.1.2a TROCAS LÍQUIDAS NULAS	29
3.1.2b TROCAS LÍQUIDAS NÃO NULAS	29
3.1.3 CIRCUITO ELÉTRICO ANALOGO	30
3.1.4 ELEMENTOS SEPARADOS EM DOIS SISTEMAS	31
3.1.5 GEOMETRIA ADMITIDA PARA OS CÁLCULOS	31
3.1.6 DIMENSÕES GENÉRICAS PARA A SEÇÃO	31
3.1.7 CONDUÇÃO UNIDIMENSIONAL DE CALOR	32
3.1.8 ESQUEMA PARA CÁLCULO DE FATORES DE FORMA (CÂMARAS SUPERIOR E INFERIOR)	32
3.1.9 ESQUEMA PARA CÁLCULO DE FATORES DE FORMA (CÂMARA CENTRAL)	33
3.2.1 RESSALTOS DE TEMPERATURA NOS MÓDULOS	45
3.2.2 SUPERFÍCIES CONSIDERADAS PARA TROCA POR RADIAÇÃO	45
3.2.3 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO FLUXO DE CALOR POR RADIAÇÃO EM CADA FACE DO ELE- MENTO DE FIO	46
3.3.1 CIRCUITO ELÉTRICO ANALOGO, REPRESENTANDO AS TROCAS TÉRMICAS DO MODELO GLOBAL	51
3.3.2 REPRESENTAÇÃO SIMPLIFICADA DO CIRCUITO	

ANÁLOGO	51
3.3.3 FLUXO DE CALOR PELO SISTEMA	51
3.3.4 REPRESENTAÇÃO DOS VOLUMES DE CONTROLE USADOS NA ANÁLISE	52
3.5.1 ESQUEMA DE TROCAS TÉRMICAS INCLUINDO A PELÍCULA DE ESMALTE	60

RELAÇÃO DE SÍMBOLOS

- a - dimensão vertical da resistência;
- $A_A + \dots + A_N$ - soma das áreas dos elementos de A a N;
- A_s - área da seção da película de resina;
- a_t - difusividade térmica do material;
- b - dimensão horizontal da resistência (seção transversal);
- B - coeficiente de expansão volumétrica;
- c - dimensão horizontal interna da estufa (seção transversal);
 - calor específico genérico para uma seção do fio;
- c_N - calor específico do núcleo do fio;
- c_s - calor específico genérico para uma parte do fio;
- d - dimensão vertical interna da estufa;
 - densidade genérica para uma seção do fio;
- dh - dimensão horizontal da seção transversal do fio incluindo a película de revestimento;
- d_N - densidade do material do núcleo do fio;
- d_s - densidade do material da superfície do fio;
- dt - intervalo finito de tempo adotado para o cálculo do transitório do fio;
- dT - diferença finita de temperaturas adotada para o cálculo do transitório do fio;
- dv - dimensão vertical da seção transversal do fio incluindo a película de revestimento;
- dx - dimensão horizontal da seção transversal do fio

- nu;
- dy - dimensão vertical da seção transversal do fio nu;
- e - dimensão horizontal externa da estufa (seção transversal);
- e_{Aço} - espessura da parede de chapa de aço-carbono;
- E_c - emissividade da superfície do fio;
- e_{inox} - espessura da parede de chapa de aço-inoxidável;
- e_{iso} - espessura da parede de isolante;
- e_p - espessura da parede (genérica);
- E_p - emissividade da parede interna da estufa
- e_{pel} - espessura da película de resina;
- E_R - emissividade da superfície da resistência;
- f - dimensão vertical externa da estufa (seção transversal);
- F_{A-B} - fator de forma de A para B, sendo A e B áreas correspondentes a elementos distintos que trocam calor por radiação;
- FF - fator que relaciona a capacidade térmica do elemento de fio com o intervalo de tempo de troca térmica (não considera a película de revestimento);
- FN - fator que relaciona a capacidade térmica do núcleo do elemento de fio com o intervalo de tempo de troca térmica;
- FS - fator que relaciona a capacidade térmica da superfície do elemento de fio com o intervalo de tempo de troca térmica;

- F1 a F4 - fatores que correspondem ao inverso da resistência equivalente de troca térmica por radiação, para as faces do elemento de fio;
- F7 e F8 - fatores que correspondem ao inverso da resistência equivalente de troca térmica por condução, para o núcleo do elemento de fio;
- g - aceleração da gravidade;
- dimensão vertical entre resistências;
- Gr_x - número de Grashof;
- h - coeficiente de convecção médio;
- h_a - coeficiente de convecção médio empírico para placas verticais;
- h_b - coeficiente de convecção médio empírico para placas horizontais aquecidas voltadas para cima ou resfriadas voltadas para baixo;
- h_c - inverso ao item anterior;
- h_i - coeficiente de convecção externo referente à placa horizontal inferior;
- h_l - coeficiente de convecção externo referente às placas laterais;
- h_s - coeficiente de convecção externo referente à placa horizontal superior;
- I_t - intervalo de tempo que uma seção de fio leva para percorrer todo o módulo ou conjunto de módulos;
- k - condutividade térmica de um material genérico;
- k_{Aço} - condutividade térmica da chapa de aço-carbono;
- k_{INOX} - condutividade térmica da chapa de aço-inoxidável;

- k_{iso} - condutividade térmica do isolante;
- k_N - condutividade térmica do material do núcleo do fio;
- k_s - condutividade térmica do material da superfície do fio;
- L - dimensão de comprimento de um módulo ou conjunto de módulos;
- dimensão característica para equações empíricas de coeficiente de convecção;
- P_{AMB} - potência perdida para o ambiente por unidade de comprimento de estufa;
- P_c - potência transferida ao fio;
- Pot - potência total consumida no processo;
- Pr_x - número de Prandtl;
- q - taxa de troca de calor;
- q/L - taxa de troca de calor por unidade de comprimento;
- q_{A-B} - taxa de calor transferida de A para B, sendo A e B elementos distintos;
- q_{amb} - taxa de calor perdida para o ambiente;
- q_{cond} - taxa de calor transferida por condução;
- q_{conv} - taxa de calor transferida por convecção;
- q_{rad} - taxa de calor transferida por radiação;
- Q_1 - taxa de calor perdida para o ambiente interno por convecção (resistência);
- Q_2 - taxa de calor perdida para o ambiente interno por convecção (parede);

- R_{ax} - número da Rayleigh;
- R_{req} - resistência térmica equivalente referente à condução;
- R_1 - resistência equivalente para condução pela parede dos módulos;
- R_2 - resistência equivalente para convecção externa;
- S - constante de Stefan-Boltzmann;
- T_{AMB} - temperatura do ambiente externo à estufa;
- T_{AR} - temperatura do ambiente interno à estufa;
- T_c - temperatura do fio em regime ou temperatura inicial no transitório ou temperatura da superfície do fio;
- T_c^i - temperatura inicial do fio no transitório (ou superfície);
- T_c^f - temperatura final do fio;
- T_f - temperatura do filme fluido;
- T_{MEIO} - temperatura do meio (interno ou externo) ao longe;
- T_N - temperatura do núcleo metálico ou temperatura inicial do núcleo do fio;
- T_N^i - temperatura inicial do núcleo do fio;
- T_N^f - temperatura final do núcleo do fio;
- T_P - temperatura média das paredes internas da estufa;
- T_{PINT} - temperatura média das paredes internas da estufa;
- T_{PEXT} - temperatura média das paredes externas da estufa;
- T_R - temperatura média da superfície da resistência;

- T_s - temperatura média da superfície do fio ou temperatura inicial no transitório;
- T_s^i - temperatura inicial da superfície do fio no transitório;
- T_s^f - temperatura final da superfície do fio no transitório;
- v - viscosidade cinemática;
- VEI - variação da energia interna no elemento de fio;
- V_L - velocidade da linha de produção;
- x - dimensão característica de uma superfície;
- dimensão interna de uma parede genérica;
- y - dimensão externa de uma parede genérica.

1. DESCRIÇÃO DO PROCESSO

Genericamente o processo de "Powder Coating" consiste na aplicação de uma camada de esmalte (por exemplo resina epoxi) em um fio metálico nu.

O fio após sofrer uma limpeza de superfície passa por um aplicador de pó (ver figura 1.1). Este equipamento é constituído por uma câmara fechada cujo fundo é uma placa porosa. O pó ou mistura de resina, catalisadores e corantes é depositado sobre a placa. Ar é injetado sob a placa após ter passado por escovas energizadas (com alta diferença de potencial elétrico). O fluxo de ar carregado eletricamente cria uma nuvem de pó e transfere as cargas elétricas às partículas sólidas. Como o fio está aterrado as partículas de mistura aderem ao mesmo, descarregando-se.

Após a aplicação da película de pó o fio penetra em uma estufa onde é realizada a cura do material depositado. O processo de cura ocorre em três fases: fusão e espalhamento, cura e pós-cura.

Ao penetrar no(s) primeiro(s) módulo(s) da estufa o fio é aquecido até atingir a temperatura de fusão do pó depositado. Após a fusão o material de isolamento se espalha, originando uma película contínua e aderente sobre a superfície. O ideal é atingir uma pequena variação na espessura da camada isolante, para não influenciar negativamente a rigidez dielétrica da mesma ao longo do fio.

Esta primeira fase é influenciada pela granulometria das partículas de pó, o "gel-time" da mistura, sua fluidez e pela temperatura da estufa. Quanto menores as partículas do pó, mais facilmente se distribuem sobre o fio, fundem e espalham-se. O "gel-time" da mistura indica o tempo necessário para que o material se funda e atinja o início do estado gel. Este tempo depende da composição da mistura do isolante e dos catalisadores utilizados, sendo particular a cada mistura. Equivale a cerca de 60% do tempo de cura. A fluidez está relacionada com o aumento da viscosidade do pó fundido à medida que ocorre a reticulação dos polímeros.

A fusão da resina ocorre em temperaturas pouco superiores a 100°C. Os catalisadores permanecem inertes desde a preparação da mistura até que esta atinja uma temperatura próxima a 130°C. A partir deste ponto estes ficam ativos e auxiliam na cura dos polímeros, reduzindo a duração do processo.

Existe um limite de temperatura para a fase de cura que pode ser determinado através do teste Koffler. Neste teste verifica-se em que temperatura o filme de resina fica poroso no contato com uma superfície metálica, ao atingir o estado de fim de cura. A presença de bolhas na película reduz a rigidez dielétrica do isolamento, o que é altamente prejudicial às características do fio. O que se controla é a rigidez dielétrica do produto final, ou seja, o fio esmaltado e não a rigidez dielétrica intrínseca do pó (matéria-prima). Em geral, a temperatura indicada pelo teste

Koffler fica em torno de 170°C . Segue-se o processo de pós-cura onde há a consolidação da reticulação e o endurecimento do material. Este processo pode ocorrer em temperaturas em torno de 220°C .

Ao sair da estufa o fio passa por um tanque de resfriamento e é rebobinado.

O modelo desenvolvido refere-se apenas à segunda etapa do processo de aplicação da película isolante ao fio, ou seja, o estudo de troca térmica durante a permanência do mesmo no interior da estufa.

A figura 1.1 esquematiza o equipamento e o processo.

A principal vantagem deste sistema de produção em relação aos tradicionais é ser muito menos poluente. Esses processos mais antigos aplicam o revestimento ao fio submetendo-o a um banho de imersão em uma mistura de resina isolante (30%) e solvente (70%). Durante o processo de aquecimento o solvente evapora e cria uma nuvem tóxica, altamente prejudicial ao ambiente. Outra vantagem é permitir o trabalho com qualquer tipo de resina (em pó) com um custo competitivo em relação às demais técnicas.

Por outro lado, existe muita dificuldade no controle do processo de deposição do pó e na uniformização das características da rigidez dielétrica do fio esmaltado em corrente alternada.

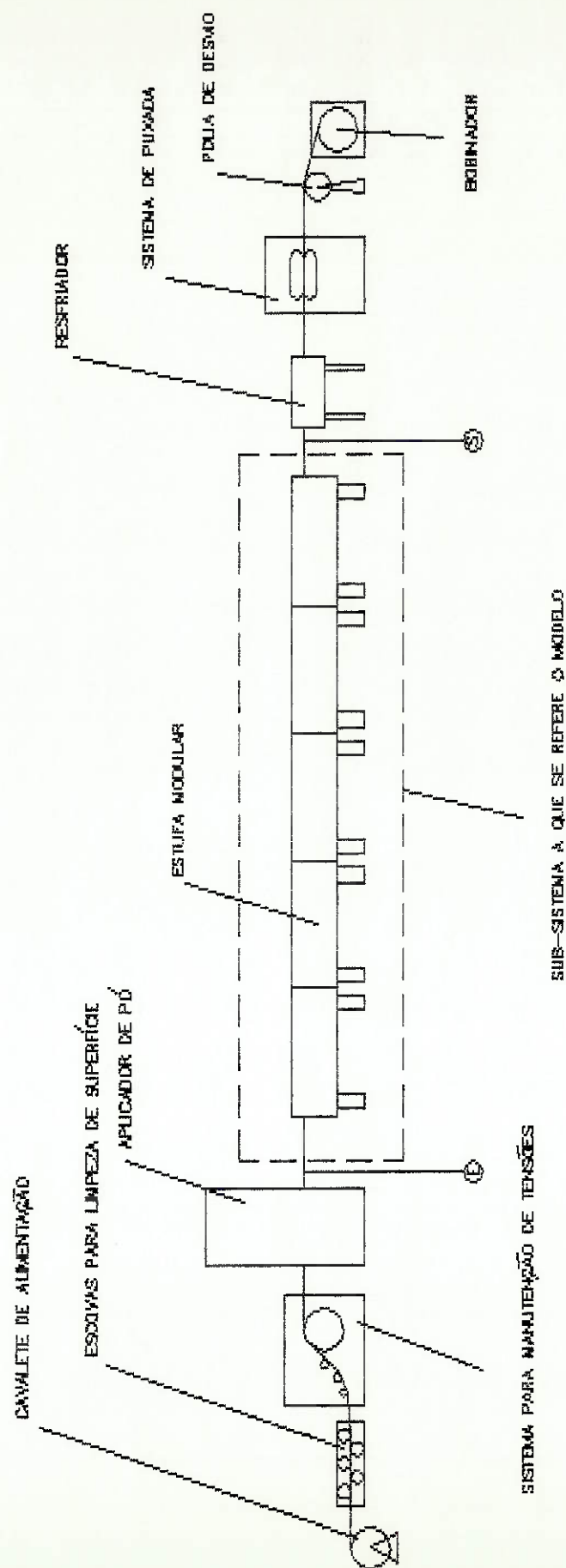


FIGURA 1.1 — ESQUEMA DA LINHA DE "POWDER COATING"

2. O EQUIPAMENTO

Neste ítem será descrito apenas o conjunto de estufas e não todo o equipamento da linha de "Powder Coating".

Segundo a figura 2.1 podemos visualizar as medidas principais da seção transversal de um dos módulos da estufa. O equipamento construído é composto de cinco módulos, sendo que cada um deles possui dois metros de comprimento. Nas partes internas superior e inferior encontramos duas fileiras de resistências elétricas de cerâmica, cada uma contendo sete destes componentes.

Os elementos resistivos tem 250 mm de comprimento e potência nominal que pode ser 250 ou 400 watts. Três dos módulos têm uma potência instalada de 3500 watts e os outros dois 5600.

Cada módulo é bipartido longitudinalmente, o que facilita em sua montagem e manutenção. Os elementos dissipadores escolhidos são moldados em cerâmica pois possuem emissividade muito alta, mesmo na temperatura de trabalho da estufa. Este fato possibilita uma redução na potência instalada em relação às estufas mais antigas, que possuíam elementos resistivos tubulares feitos em aço inoxidável.

No centro de uma das paredes laterais encontra-se um termopar, que fornece dados sobre a temperatura do meio interno ao módulo. Estes dados são enviados ao sistema de controle da estufa que é independente para cada um dos

módulos. O sistema é denominado PID (Proporcional, Integral e Derivativo). De acordo com a variação da temperatura interna do módulo o sistema modula a potência enviada ao mesmo. É diferente de um sistema "ON/OFF", que trabalha sempre à plena potência quando acionado. Deste modo consegue-se uma variação mais suave da temperatura de regulação da estufa durante a operação do sistema. Cada um dos módulos permanece à temperatura definida pelo operador no início da produção da linha.

As paredes internas da estufa são construídas em aço inoxidável polido (chapa comercial AISI 304) para reduzir a capacidade de absorção de radiação das paredes. As superfícies externas são feitas de chapas de aço carbono comum (SAE 1020) recobertas por uma camada de tinta especial à base de óxido de alumínio, resistente a temperaturas elevadas. O óxido de alumínio tem a função de evitar a oxidação da chapa externa à altas temperaturas e ao mesmo tempo aumentar o poder emissivo das paredes externas da estufa. Desta forma, o calor que escapa pela isolação é dissipado facilmente, reduzindo a temperatura da superfície externa.

O interior dos módulos é preenchido por manta de fibras de vidro para impedir perdas excessivas para o ambiente.

O sistema de fixação e sustentação dos módulos permite que cada um deles possa ser colocado em uma altura independente em relação ao solo. Desta maneira, eles não são dispostos niveladamente, para que a estufa acompanhe a

catenária do fio em seu interior. Procura-se com isto manter o fio centralizado aos módulos. A catenária existe e não pode ser evitada, pois isto implicaria em tensionar muito o fio. Sendo este de alumínio ou cobre, escoaria facilmente em altas temperaturas.

Esta limitação na tensão aplicada ao fio e o longo comprimento em balanço geram outros problemas, como a oscilação do cabo no interior dos módulos. Por este motivo, a passagem interna tem o formato retangular com a dimensão vertical muito maior que a horizontal.

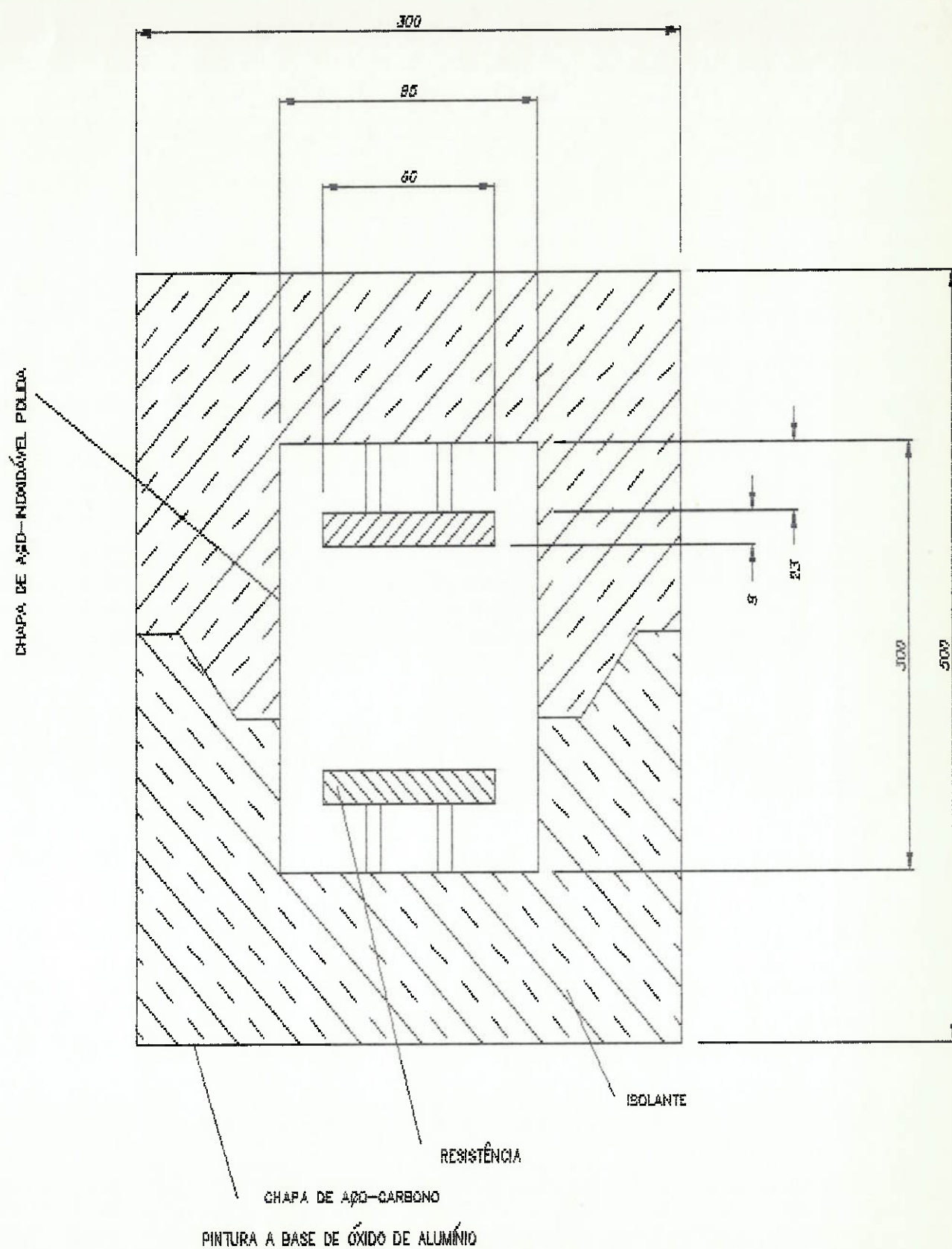


FIGURA 2.1 - CORTE DA SEÇÃO TRANSVERSAL DE UM MÓDULO

3. O MODELO

Não se trata exclusivamente de um modelo, mas de uma série de modelos que integram uma simulação global. Este modelo final também não é único, pois uma série de hipóteses adicionais foram acrescentadas durante a sua evolução e outras ainda podem ser incluídas, fazendo surgir modelos evolutivos cada vez mais refinados.

O primeiro passo foi realizar a modelagem da estufa como um meio contínuo, desprezando o fio em seu interior. Posteriormente, adicionou-se ao modelo da estufa o fio, sempre considerando o sistema em regime plenamente desenvolvido (regime permanente).

Em paralelo à primeira etapa, foi desenvolvido um modelo em regime transitório para o núcleo metálico. Considerava-se que o fio caminhava em uma estufa onde era conhecida a distribuição de temperaturas. O núcleo metálico foi tratado como um elemento não revestido, mas com as propriedades de superfície (emissividade e absortividade) idênticas às da resina de revestimento.

A terceira etapa foi unir os dois modelos em um único, onde a cada passo eram calculadas as temperaturas de equilíbrio e o transitório para o núcleo do fio.

O último refinamento foi acrescentar ao modelo a película de revestimento ao redor do fio. Assim, o calor chegaria ao núcleo metálico através de condução pela película.

A seguir, cada uma das etapas terá descrição completa e todas as hipóteses feitas serão explicitadas.

3.1 MODELAGEM DA ESTUFA

Trata-se de uma modelagem simplificada, onde não consideraremos o fio passando pelo interior da estufa. Como dados para o problema temos apenas as características geométricas da estufa, a temperatura do meio externo, as características dos materiais que constituem os módulos e a temperatura a que deve ser mantido o meio interno.

Na figura 3.1.1, k significa troca de calor por condução, S significa troca de calor por radiação e h , convecção.

Abaixo serão listadas as hipóteses que conduzirão a análise e suas consequências:

- a estufa está em equilíbrio com o meio (regime permanente);
- a temperatura das paredes metálicas internas será considerada uniforme. Portanto, não há troca líquida de calor entre as paredes metálicas internas (ver figura 3.1.2a);
- todos os corpos são convexos, ou seja, a radiação emitida por um corpo não incide sobre outras partes de sua superfície. Isto não é verdade apenas no caso dos elementos

resistivos, pois os mesmos possuem pequenas concavidades na parte voltada para o centro da estufa;

- desprezam-se os efeitos de bordo. É o mesmo que afirmar que a estufa é contínua (não modular) e infinita. Não é real, mas para facilitar na modelagem esta hipótese é feita. Seria o mesmo que considerar módulos com extremidades adiabáticas;

- considera-se apenas condução bidimensional na seção transversal dos módulos. Esta hipótese reforça a anterior e vice-versa. Supõe-se que a diferença de temperaturas entre duas seções contíguas seja tão pequena, que a condução de calor longitudinal torna-se desprezível;

- a temperatura das resistências também será considerada uniforme. Admite-se ainda que as mesmas irradiem igualmente em qualquer direção, ao longo de toda a superfície;

- as paredes externas da estufa possuem temperatura uniformemente distribuída (consequência das hipóteses anteriores). Pode-se verificar experimentalmente que isto não é verdade. Consideraremos para efeito de cálculo a temperatura uniforme como sendo a média das temperaturas;

- resume-se as hipóteses anteriores dizendo que as temperaturas são uniformemente distribuídas ao longo do equipamento;

- é desprezado o calor perdido por condução através das placas e pinos que sustentam os elementos resistivos.

Assumimos que estes são isolados do resto da estufa, apenas perdendo calor por radiação e convecção;

- são desprezados os efeitos da radiação na superfície externa, apenas como primeira aproximação;

- o elemento resistivo isola totalmente a parte inferior da estufa da parte superior, em relação às trocas por radiação;

- será desprezado o calor irradiado lateralmente pelos elementos resistivos, sendo consideradas na análise apenas as faces superior e inferior;

- os elementos resistivos serão considerados como um único bloco (contínuo longitudinalmente) e não como unidades espaçadas. Desta maneira, todo corte de seção incluirá os mesmos.

Na figura 3.1.3 está representado o circuito elétrico análogo que esquematiza as trocas térmicas, segundo as hipóteses simplificadoras assumidas.

Ainda na figura 3.1.3 verificamos a necessidade de incluir hipóteses adicionais. Como pode ser visto no esquema, se admitirmos a temperatura da parede maior que a temperatura do ar (interno) e menor que a da resistência, teremos no nó de temperatura T_{AR} um "sorvedouro" de energia. Resultam duas hipóteses adicionais independentes:

- o ar interno é um meio infinito, constituindo-se a soma $Q_1 + Q_2$ em perdas para o ambiente interno;

- o meio interno não é um meio infinito (hipótese mais adequada), o que obriga que o ar (interno) tenha temperatura

(T_{AR}) superior à temperatura das paredes internas da estufa. Todo o calor cedido ao ar pelos dissipadores de energia elétrica será transferido às paredes internas por convecção natural.

A segunda hipótese é a mais razoável, já que o meio interno não é infinito, ou seja, um meio que permaneceria sempre à mesma temperatura, independentemente da atuação da estufa. Sabemos que ocorre exatamente o contrário, a estufa existe com o propósito de alterar o meio interno, senão, para qualquer potência dissipada teríamos o meio interno sempre à mesma temperatura.

Mesmo assumindo a segunda hipótese, podemos considerar o meio interno como um meio infinito para um intervalo infinitesimal de tempo. Além disso, a segunda hipótese não supõe perdas internas, porque todo calor escapa pelas paredes. Isto também é falso, já que existe uma certa circulação de ar nas extremidades dos módulos (desconsiderada ao desprezarmos efeitos de bordo).

Para escaparmos de qualquer dúvida podemos formular o problema de outra forma. Ao invés de interpretarmos um circuito, isolemos os corpos (ver figura 3.1.4).

Temos duas equações a duas incógnitas. As equações após montadas devem ser mutuamente satisfeitas.

EQUAÇÃO DE BALANÇO DE ENERGIA PARA A RESISTÊNCIA ELÉTRICA

$$\text{calor gerado} = \text{calor perdido por convecção e radiação}$$

EQUAÇÃO DE BALANÇO DE ENERGIA PARA A PAREDE

$$\begin{array}{ccc} \text{calor recebido} & = & \text{calor perdido} \\ \text{por convecção e radiação} & & \text{por condução e convecção} \end{array}$$

Na realidade temos duas equações a três incógnitas, pois desconhecemos a potência consumida pela resistência. Surge como terceira equação uma condição resultante da última hipótese assumida:

$$\begin{array}{ccc} \text{calor que a resistência} & = & \text{calor que a parede} \\ \text{perde por convecção} & & \text{recebe por convecção} \end{array}$$

Resolvendo a segunda e terceira equações encontramos as temperaturas médias (uniformes). Tiramos a potência consumida da primeira equação, que deve coincidir com o valor da potência que as paredes perdem para o exterior.

3.1.1 EQUAÇÕES

Assumindo a geometria descrita na figura 3.1.5.

Para o elemento dissipador:

- Troca de calor por convecção:

$$q/L = h \cdot (2a+2b) \cdot (T_R - T_{AR}) \quad (3.1.1.1)$$

Sendo: - q/L - taxa de troca de calor por unidade de comprimento;

- L - comprimento da estufa ou módulo;
- h - coeficiente de convecção médio;
- a,b - dimensões do elemento;
- T_R - temperatura da resistência;
- T_{AR} - temperatura do ambiente interno.

- Troca líquida por radiação, entre uma superfície da resistência e outra superfície qualquer:

$$q = \frac{S \cdot (T_R^4 - T_P^4)}{\frac{1-E_R}{E_R \cdot A_R} + \frac{1}{A_R \cdot F_{R-P}} + \frac{1-E_P}{E_P \cdot A_P}} \quad (3.1.1.2)$$

$$q = \frac{A_R \cdot S \cdot (T_R^4 - T_P^4)}{\frac{1-E_R}{E_R} + \frac{1}{F_{R-P}} + \frac{1-E_P}{E_P} \cdot \frac{A_R}{A_P}}$$

$$q/L = \frac{b \cdot S \cdot (T_R^4 - T_P^4)}{\frac{1-E_R}{E_R} + \frac{1}{F_{R-P}} + \frac{1-E_P}{E_P} \cdot \frac{A_R}{A_P}} \quad (3.1.1.3)$$

- Sendo: - b - largura da resistência;
- S - constante de Stefan-Boltzmann;
- E_R, E_P - emissividades da resistência e da parede;
- F_{R-P} - fator de forma da resistência para a parede (depende da geometria);

Para a parede (ver figura 3.1.6):

- Troca de calor por convecção:

$$q/L = 2.h.(c + d).(T_{AR} - T_P) \quad (\text{interna}) \quad (3.1.1.4)$$

$$q/L = 2.h.(e + f).(T_{PEXT} - T_P) \quad (\text{externa}) \quad (3.1.1.5)$$

- Troca de calor por radiação: as quantidades transferidas são as mesmas analisadas para as resistências. Externamente despreza-se a troca de calor por radiação.

- Troca de calor por condução (ver figura 3.1.7):

$$q = (T_P - T_{PEXT})/R_{Teq} = L.(x + y).k.(T_P - T_{PEXT})/(2.e_P)$$

$$q/L = \frac{T_P - T_{PEXT}}{\frac{2.e_P}{k.(x + y)}} \quad (3.1.1.6)$$

Sendo: - T_{PEXT} - temperatura da parede externa;

- e_P - espessura da parede;

- k - condutividade térmica do material;

- R_{Teq} - resistência térmica equivalente;

- x, y - dimensões das paredes.

- Condução horizontal:

$$q/L = \frac{T_P - T_{PEXT}}{\frac{e_{INOX}}{k_{INOX}.d} + \frac{2.e_{ISO}}{k_{ISO}.(d + f)} + \frac{e_{AÇO}}{k_{AÇO}.f}} \quad (3.1.1.7)$$

Sendo: - e - espessura da chapa ou isolante;

- k - condutividade do material;

- d, f - dimensões correspondentes a x e y .

- Condução vertical:

$$q/L = \frac{T_P - T_{PEXT}}{\frac{e_{INOX}}{k_{INOX}.c} + \frac{2.e_{ISO}}{k_{ISO}.(c + e)} + \frac{e_{AÇO}}{k_{AÇO}.e}} \quad (3.1.1.8)$$

Sendo: - c, e - dimensões correspondentes a x e y.

Usando a analogia com resistores em série podemos eliminar a temperatura desconhecida (T_{PEXT}) das equações (3.1.1.4), (3.1.1.5), (3.1.1.7) e (3.1.1.8). Resulta:

$$q/L = \frac{T_P - T_{PEXT}}{\frac{e_{INOX}}{k_{INOX}.d} + \frac{2.e_{ISO}}{k_{ISO}.(d + f)} + \frac{e_{AÇO}}{k_{AÇO}.f} + \frac{1}{h_L.f}} \quad (3.1.1.9)$$

$$q/L = \frac{T_P - T_{PEXT}}{\frac{e_{INOX}}{k_{INOX}.c} + \frac{2.e_{ISO}}{k_{ISO}.(c + e)} + \frac{e_{AÇO}}{k_{AÇO}.e} + \frac{1}{h_s.e}} \quad (3.1.1.10a)$$

$$q/L = \frac{T_P - T_{PEXT}}{\frac{e_{INOX}}{k_{INOX}.c} + \frac{2.e_{ISO}}{k_{ISO}.(c + e)} + \frac{e_{AÇO}}{k_{AÇO}.e} + \frac{1}{h_I.e}} \quad (3.1.1.10b)$$

Sendo: - h_L - coeficiente de convecção externo referente às faces verticais;

- h_s - coeficiente de convecção externo referente à placa horizontal superior;

- h_I - coeficiente de convecção externo referente à placa horizontal inferior.

3.1.2 ANÁLISE DOS FATORES DE FORMA

Adotaremos as medidas apresentadas na figura 2.1.

Será considerado que não há troca de radiação entre as chapas horizontais e verticais internas, pois além de possuírem a mesma temperatura (por hipótese), as fileiras de resistências dividem a câmara interna em três câmaras menores e com paredes que não se comunicam.

- Fator de forma da resistência para a chapa horizontal (ver figura 3.1.8):

$$F_{A-C+B+C'} = F_{A-C} + F_{A-B} + F_{A-C'}$$

$$A_A.F_{A-C+B+C'} = A_A.F_{A-C} + A_A.F_{A-B} + A_A.F_{A-C'}$$

$$F_{A-C} = F_{A-C'} \text{ (simetria)}$$

Chamando: $D = C+B+C'$

$$A_A.F_{A-D} = 2.A_A.F_{A-C} + A_A.F_{A-B}$$

$$A_A.F_{A-D} = 2.A_C.F_{C-A} + A_B.F_{B-A}$$

$$F_{B-A} = (A_A.F_{A-D} - 2.A_C.F_{C-A})/A_B \quad (3.1.2.1)$$

Para nossos cálculos consideraremos a área como sendo a dimensão transversal dos elementos, já que todos possuem a mesma dimensão longitudinal. Esta será sempre tomada como sendo muito maior que as dimensões transversais. Isto apenas não é real quando analisamos trechos próximos às extremidades da estufa.

Assim sendo:

$$A_A = c$$

$$A_B = b$$

$$A_C = (c-b)/2$$

Todos os dados referentes às propriedades dos materiais e fatores de forma serão extraídos da bibliografia indicada ou de catálogos de fabricantes.

Da referência 1, página 357 (figura 8.12):

$$Y/D \gg 10, X/D = 95/23 = 4,13 \text{ e } F_{A-D} = 73\%$$

Da referência 2, página E 2.8 (figura superior, embora não ocorra $S \ll D$):

$$R_1 = L/D \gg 10, R_2 = W/D = 95/23 = 4,13 \text{ e } F_{C-A} = 44,25\%$$

Portanto:

$$F_{B-A} = (95.0,73 - 2.17,5.0,4425)/60 = 90\%$$

Como verificação à aproximação feita, podemos calcular F_{C-A} de outra forma:

$$F_{C-A} + F_{C-E} + F_{C-F} = 1$$

$$F_{C-A} = 1 - F_{C-E} - F_{C-F} \quad (3.1.2.2)$$

Da referência 1, página 357 (figura 8.14):

$$Y/X < 0,1, Z/X < 0,1 \text{ e } F_{C-E} = 0,28$$

$$F_{C-F} = \frac{c.F_{A-F} - (c - (c - b)/2).F_{B+C-F}}{(c - b)/2}$$

$$F_{C-F} = \frac{c.F_{A-F} - ((c + b)/2).F_{B+C-F}}{(c - b)/2} \quad (3.1.2.3)$$

Como $L \gg Y$ ou Z todos os fatores são próximos a 0,28:

$$F_{C-F} = 0,28$$

Os resultados para F_{C-F} e F_{C-E} substituídos em (3.1.2.2) fornecem:

$$F_{C-A} = 0,44$$

Isto demonstra que no limite, quando L tende a infinito, a aproximação é razoável.

Como esta superfície transfere quase 90% da energia que emite para a chapa horizontal, desprezaremos as duas áreas de chapa vertical que formam as câmaras menores e que recebem 5% da energia cada.

- Fator de forma da resistência para as chapas verticais (câmara central).

De acordo com a figura 3.1.9 e a referência 2, página E 2.8 (figura inferior, embora nem sempre $S \ll L$):

$$F_{1-2+3+4+5+6+7} = F_{1-2} + F_{1-3} + F_{1-4} + F_{1-5} + F_{1-6} + F_{1-7}$$

$$A_1.F_{1-2+3+4+5+6+7} = A_1.F_{1-2} + A_1.F_{1-3} + A_1.F_{1-4} + A_1.F_{1-5} + \\ + A_1.F_{1-6} + A_1.F_{1-7}$$

$$A_1.F_{1-2+3+4+5+6+7} = A_2.F_{2-1} + A_3.F_{3-1} + A_4.F_{4-1} + A_5.F_{5-1} + \\ + A_6.F_{6-1} + A_7.F_{7-1} \quad (3.1.2.4)$$

$$A_2 = A_3 = A_4 = A_5 = A_6 = A_7 = L.b/6$$

Como D tende a infinito, temos como valor limite para todos os F_{i-1} o valor 44,5%.

$$A_1.F_{1-2+3+4+5+6+7} = 6.A_2.F_{2-1}$$

$$A_1.F_{1-2+3+4+5+6+7} = A_R.F_{R-P} \quad (3.1.2.5)$$

$$A_R = 6.A_2 \quad \text{e} \quad F_{R-P} = 44,5\%$$

Pode-se verificar a aproximação através do uso da figura 8.12 da referência 1, página 357, em relação às paredes verticais:

$$g = 300 - 2.(23 + 9) = 236 \text{ mm}$$

$$Y/D \gg 10, \quad X/D = 236/95 = 2,48 \text{ e } F_{P-P} = 0,63$$

$$F_{P-C} = (1 - 0,63)/2 = 0,185$$

$$F_{C-P} = (A_P/A_C).F_{P-C} = (0,236/0,095) = 46\%$$

Outra forma de verificarmos a validade das aproximações é calcular através da mesma referência o quanto a face menor de uma seção de 60 x 236 mm emite à sua face oposta:

$$X/D = 95/236 = 0,254, \quad Y/D \gg 10 \text{ e } F_{R-R} = 11\%$$

3.1.3 SISTEMA RESULTANTE

- 1ª EQUAÇÃO: calor cedido ao ar pelos dissipadores é a mesma energia que o ar transfere à parede (impõe-se $T_P < T_{AR}$).

$$\begin{aligned} 2.(2.h_1.a + h_2.b + h_3.b).(T_R - T_{AR}) = \\ = (2.h_4.d + h_5.c + h_6.c).(T_{AR} - T_P) \end{aligned} \quad (3.1.3.1)$$

Nas equações fiz distinção entre $h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6$ pois o coeficiente de convecção é função do meio fluido, da

geometria do problema e da diferença de temperaturas entre superfície e meio.

No entanto, existem fórmulas aproximadas, resultantes de dados empíricos, que fornecem com boa aproximação um valor de h para convecção natural em função da diferença de temperaturas entre superfície e meio e de uma dimensão característica do problema.

Por ser a máxima velocidade da linha muito baixa, tratamos o problema como convecção natural, já que as baixas velocidades pouco influem no escoamento do fluido ao redor do fio. Para adotarmos a equação correta devemos conhecer a natureza do escoamento, se laminar ou turbulento.

Número de Grashof (ver página 295 da referência 1):

$$Gr_x = g.B.(T_P - T_{MEIO}).x^3/\nu^2 \quad (3.1.3.1a)$$

Número de Prandtl: $Pr_x = \nu/\alpha$ (3.1.3.1b)

Número de Rayleigh: $Ra_x = Gr_x.Pr_x$ (3.1.3.1c)

Temperatura do filme fluido:

$$T_f = (T_P + T_{MEIO})/2 \quad (3.1.3.1d)$$

Coeficiente de expansão volumétrica de um gás ideal:

$$B = 1/T_f \text{ (absoluta)} \quad (3.1.3.1e)$$

Sendo: - g - aceleração da gravidade;

- T_P - temperatura da parede;

- T_{MEIO} - temperatura do meio ao longe;

- x - dimensão característica da superfície;

- ν - viscosidade cinemática;
- a_t - difusividade térmica.

Supondo uma diferença de 100°C entre parede e meio ou fio e meio (interno), T_{AR} próxima a 300°C, a máxima dimensão do sistema 0,3 m e a mínima 2 mm, chegamos aos seguintes valores:

$$Ra_{max} = 1,5 \cdot 10^7$$

$$Ra_{min} = 4,42$$

As equações para escoamento laminar são válidas no intervalo $10^4 < Ra_x < 10^9$. Verificamos que para a ordem de grandeza das dimensões dos fios, os valores de Ra estão fora deste intervalo, ainda assim adotaremos as mesmas equações no modelo.

As fórmulas empíricas são (ver referência 1, página 319):

$$h_a = 1,42 \cdot (dT/L)^{1/4} \quad (3.1.3.2a)$$

$$h_b = 1,32 \cdot (dT/L)^{1/4} \quad (3.1.3.2b)$$

$$h_c = 0,61 \cdot (dT/L^2)^{1/5} \quad (3.1.3.2c)$$

Observação: as unidades estão sempre no Sistema Internacional.

A relação (3.1.3.2a) refere-se à placas verticais, (3.1.3.2b) trata de placas horizontais aquecidas voltadas para cima, ou placas resfriadas voltadas para baixo. A última relação é aplicada em situações inversas às de (3.1.3.2b).

Para provar a boa aproximação das fórmulas, procuramos o valor tabelado 4,5 W/m.°C para uma placa vertical aquecida de 300 mm de altura sujeita a um dT de 30°C (ver página 13 da referência 1). Substituindo estes valores na equação (3.1.3.2a) chegamos ao resultado 4,49 W/m.°C.

Assim, as equações finais ficam da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 & 2 \cdot \{ 2 \cdot a \cdot 1,42 \cdot [(T_R - T_{AR})/a]^{1/4} \cdot (T_R - T_{AR}) + \\
 & + 1,32 \cdot b \cdot [(T_R - T_{AR})/b]^{1/4} \cdot (T_R - T_{AR}) + \\
 & + 0,61 \cdot b \cdot [(T_R - T_{AR})/b^2]^{1/5} \cdot (T_R - T_{AR}) \} = \\
 & = 2 \cdot d \cdot 1,42 \cdot [(T_{AR} - T_P)/d]^{1/4} \cdot (T_{AR} - T_P) + \\
 & + 1,32 \cdot c \cdot [(T_{AR} - T_P)/c]^{1/4} \cdot (T_{AR} - T_P) + \\
 & + 0,61 \cdot c \cdot [(T_{AR} - T_P)/c^2]^{1/5} \cdot (T_{AR} - T_P) \quad (3.1.3.3)
 \end{aligned}$$

- 2ª EQUAÇÃO: balanço de energia para a parede.

$$q_{rad} + q_{conv} = q_{amb}$$

$$\begin{aligned}
 q_{rad}/L = & \frac{2 \cdot b \cdot S \cdot (T_R^4 - T_P^4)}{\frac{1 - E_R}{E_R} + \frac{1}{F_{R-PHOR}} + \frac{1 - E_P}{E_P} \cdot \frac{b}{g}} + \\
 & + \frac{4 \cdot b \cdot S \cdot (T_R^4 - T_P^4)}{\frac{1 - E_R}{E_R} + \frac{1}{F_{R-PHOR}} + \frac{1 - E_P}{E_P} \cdot \frac{b}{g}} \quad (3.1.3.4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q_{conv}/L = & 2 \cdot d \cdot 1,42 \cdot [(T_{AR} - T_P)/d]^{1/4} \cdot (T_{AR} - T_P) + \\
 & + 1,32 \cdot c \cdot [(T_{AR} - T_P)/c]^{1/4} \cdot (T_{AR} - T_P) + \\
 & + 0,61 \cdot c \cdot [(T_{AR} - T_P)/c^2]^{1/5} \cdot (T_{AR} - T_P) \quad (3.1.3.5)
 \end{aligned}$$

$$q_{amb}/L = 2 \cdot [(3.1.1.9)] + [(3.1.1.10a) + (3.1.1.10b)] \quad (3.1.3.6)$$

Observação: os termos h_L , h_s , h_i serão estimados para uma temperatura média de parede externa igual a 80°C . Posteriormente discutiremos este detalhe.

A 2ª equação reduz-se a:

$$(3.1.3.4) + (3.1.3.5) = (3.1.3.6) \quad (3.1.3.7)$$

- 3ª EQUAÇÃO: balanço de energia para a resistência.

O termo Pot refere-se à energia liberada por unidade de comprimento para apenas um elemento.

$$\begin{aligned} \text{Pot} = & \frac{b.S.(T_R^4 - T_P^4)}{\frac{1 - E_R}{E_R} + \frac{1}{F_R - PHOR} + \frac{1 - E_P}{E_P} \frac{b}{g}} + \\ & + \frac{2.b.S.(T_R^4 - T_P^4)}{\frac{1 - E_R}{E_R} + \frac{1}{F_R - PHOR} + \frac{1 - E_P}{E_P} \frac{b}{g}} + \\ & + 2.a.1,42.[(T_R - T_{AR})/a]^{1/4} \cdot (T_R - T_{AR}) + \\ & + 1,32.b.[(T_R - T_{AR})/b]^{1/4} \cdot (T_R - T_{AR}) + \\ & + 0,61.b.[(T_R - T_{AR})/b^2]^{1/5} \cdot (T_R - T_{AR}) \quad (3.1.3.8) \end{aligned}$$

3.1.4 RESOLUÇÃO DO SISTEMA

Isolando-se em (3.1.3.7) o termo T_R , obtemos uma equação para T_R em função de T_P . Admite-se um primeiro valor para T_P menor que T_{AR} e obtém-se uma estimativa para T_R . Estes dois resultados são levados à equação (3.1.3.3) que

deve ser satisfeita, segundo uma precisão pré-estabelecida. Através de cálculos iterativos chega-se a valores que melhor satisfaçam às duas equações.

3.1.5 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Abaixo serão listados alguns dados referentes aos materiais utilizados na construção do equipamento. Todos os valores foram retirados das referências 1 e 2 (exceto para a lã de vidro, onde utilizamos os dados do fabricante).

- Emissividade:

- porcelana: 0,92 (22°C)

faixa tolerável: 0,90 - 0,99

- chapa de inox polida: 0,074 (100°C)

tipo 301: 0,54 - 0,63 (232 - 940°C)

- Condutividade Térmica:

- chapa de aço inoxidável: 17,5 W/m.°C (100 - 400°C)

- chapa de aço-carbono: 47 W/m.°C (100 - 400°C)

- lã de vidro: 0,035 - 0,075 W/m.°C (100 - 400°C)

Observação. Durante o projeto da estufa foram utilizadas tabelas do fabricante que forneciam a espessura de isolante de acordo com a diferença de temperaturas que se desejava entre as duas paredes. Porém, durante a operação da estufa verificou-se que a temperatura externa da mesma ultrapassava em muito os 40°C planejados com os dados do fabricante. Desta forma, desprezaremos os dados apresentados acima e

utilizaremos valores próprios, conseguidos através da temperatura externa média medida da estufa e da equação da resistência térmica equivalente para a parede.

Após os testes do modelo podemos alterar o valor da condutividade do isolante, para que se obtenha através deste a temperatura medida nos testes de produção.

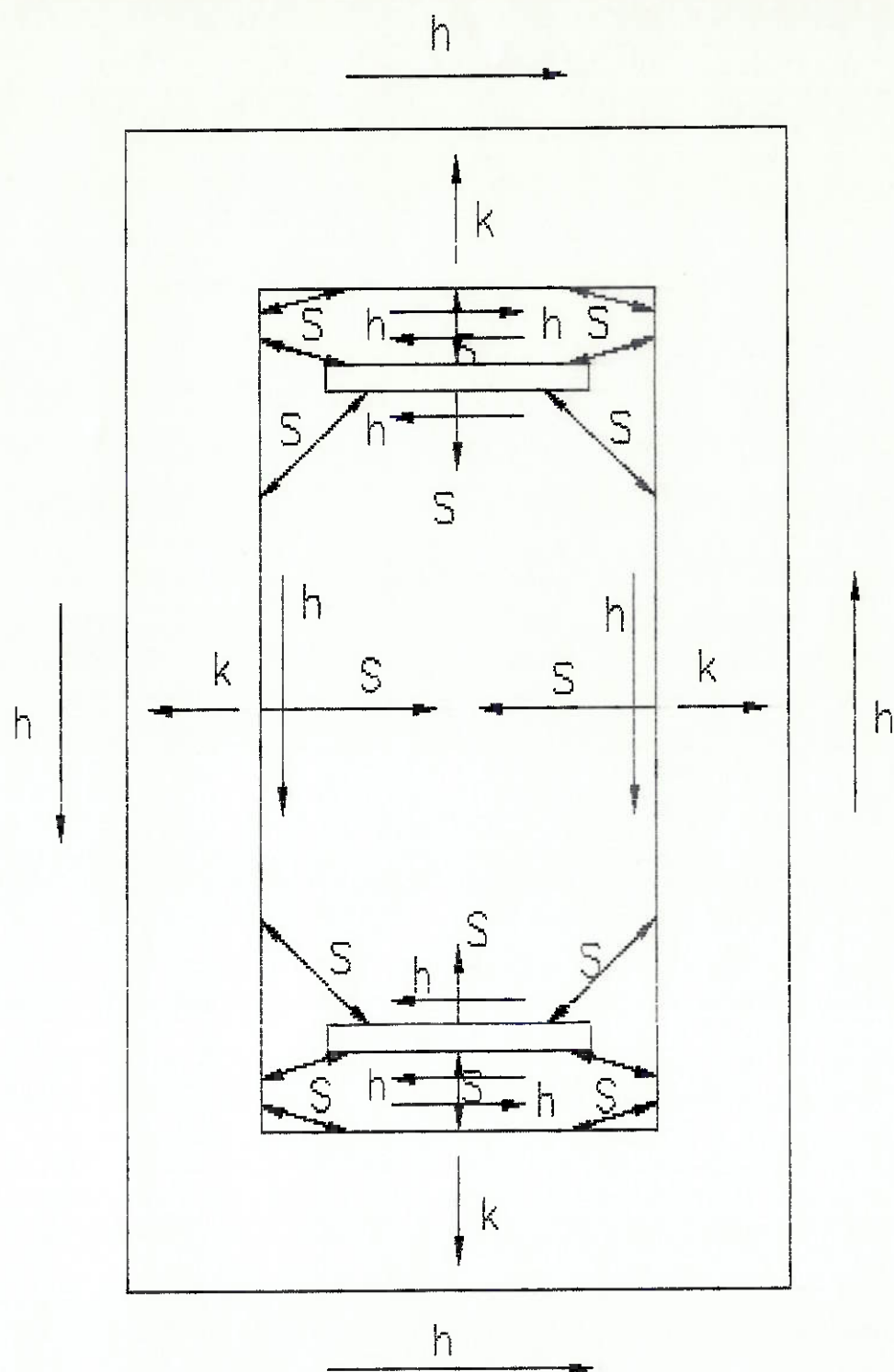


FIGURA 3.1.1 - ESQUEMA DE TROCAS TÉRMICAS
PARA UMA SEÇÃO

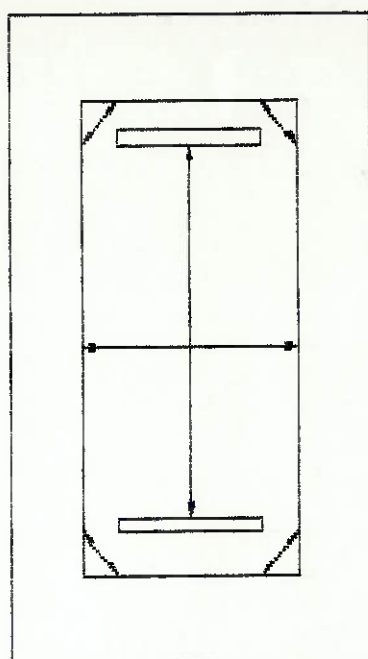


FIGURA 3.1.2a - TROCAS LÍQUIDAS NULAS

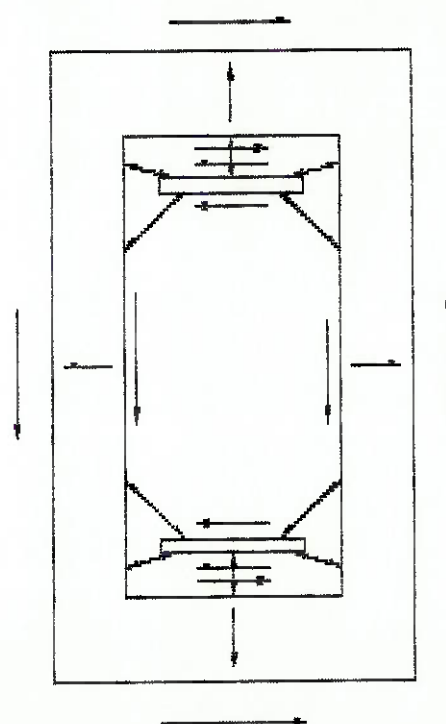


FIGURA 3.1.2b - TROCAS LÍQUIDAS NÃO NULAS

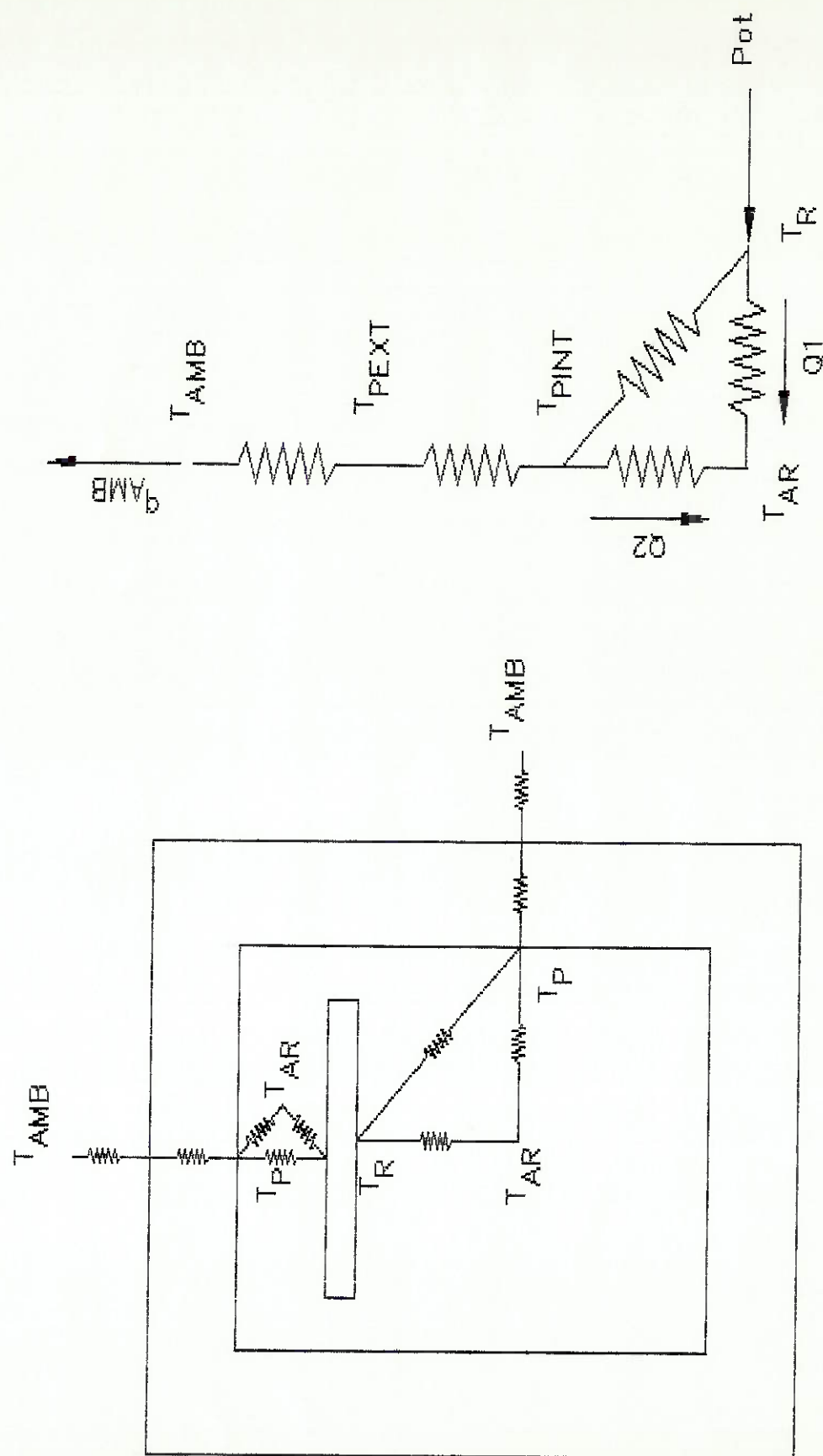


FIGURA 3.1.3 - CIRCUITO ELÉTRICO ANALÓGICO

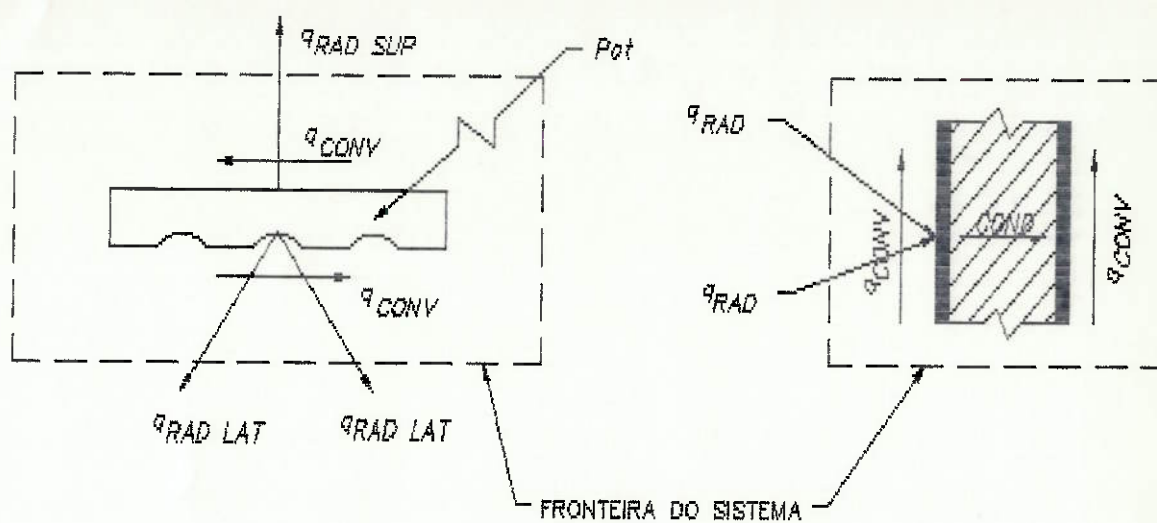


FIGURA 3.1.4 - ELEMENTOS SEPARADOS EM DOIS SISTEMAS

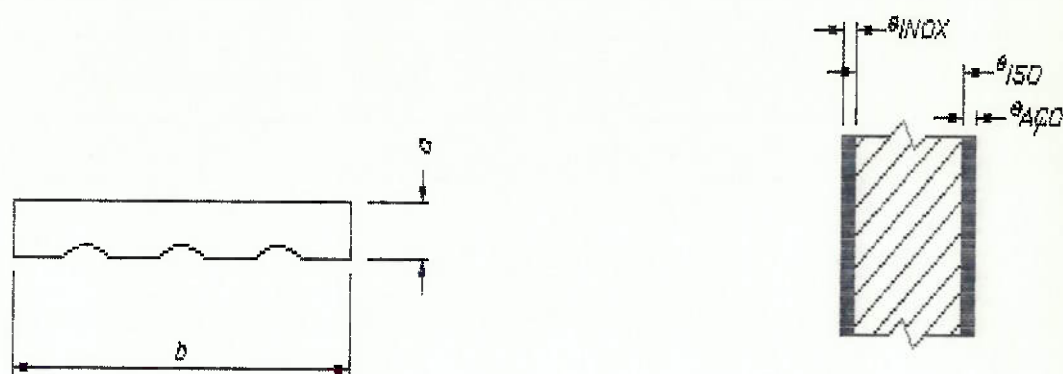


FIGURA 3.1.5 - GEOMETRIA ADMITIDA PARA OS CÁLCULOS

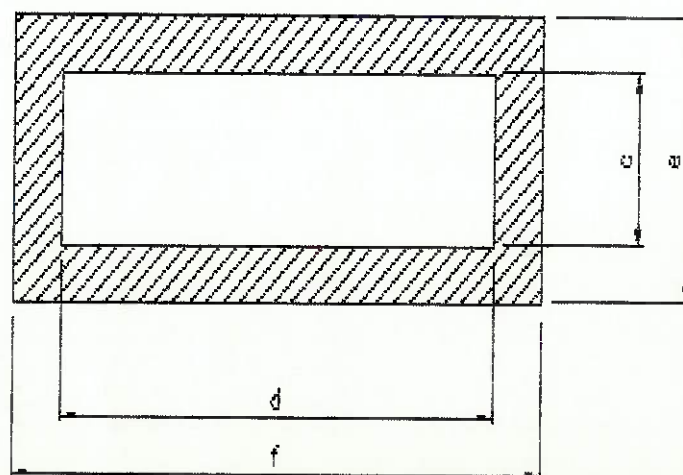


FIGURA 3.1.6 - DIMENSÕES GENÉRICAS PARA A SEÇÃO

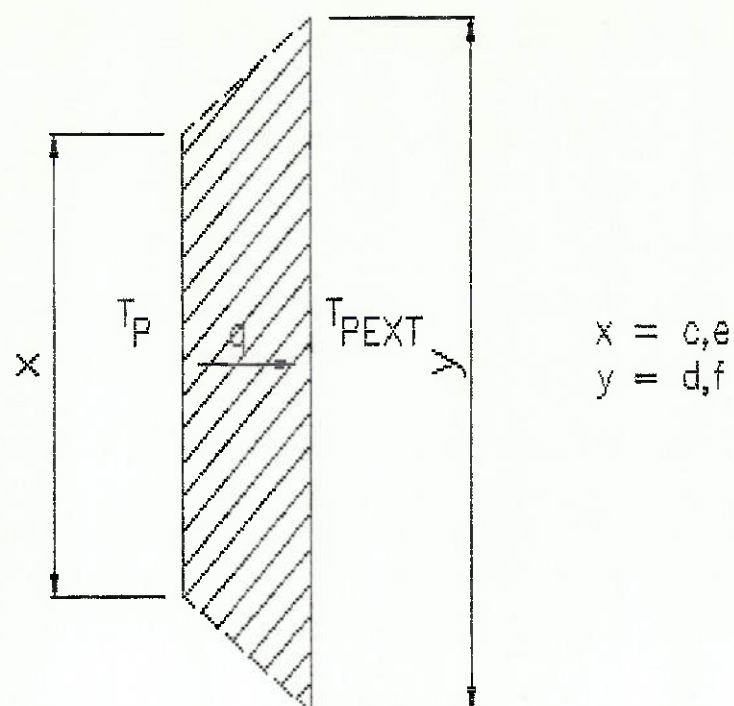
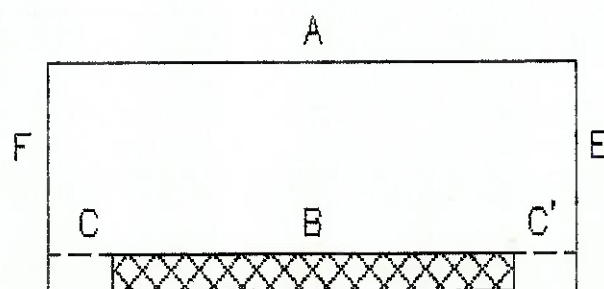


FIGURA 3.1.7 - CONDUÇÃO UNIDIMENSIONAL DE CALOR

FIGURA 3.1.8 - ESQUEMA PARA CÁLCULO DE FATORES DE FORMA
(CÂMARAS SUPERIOR E INFERIOR)

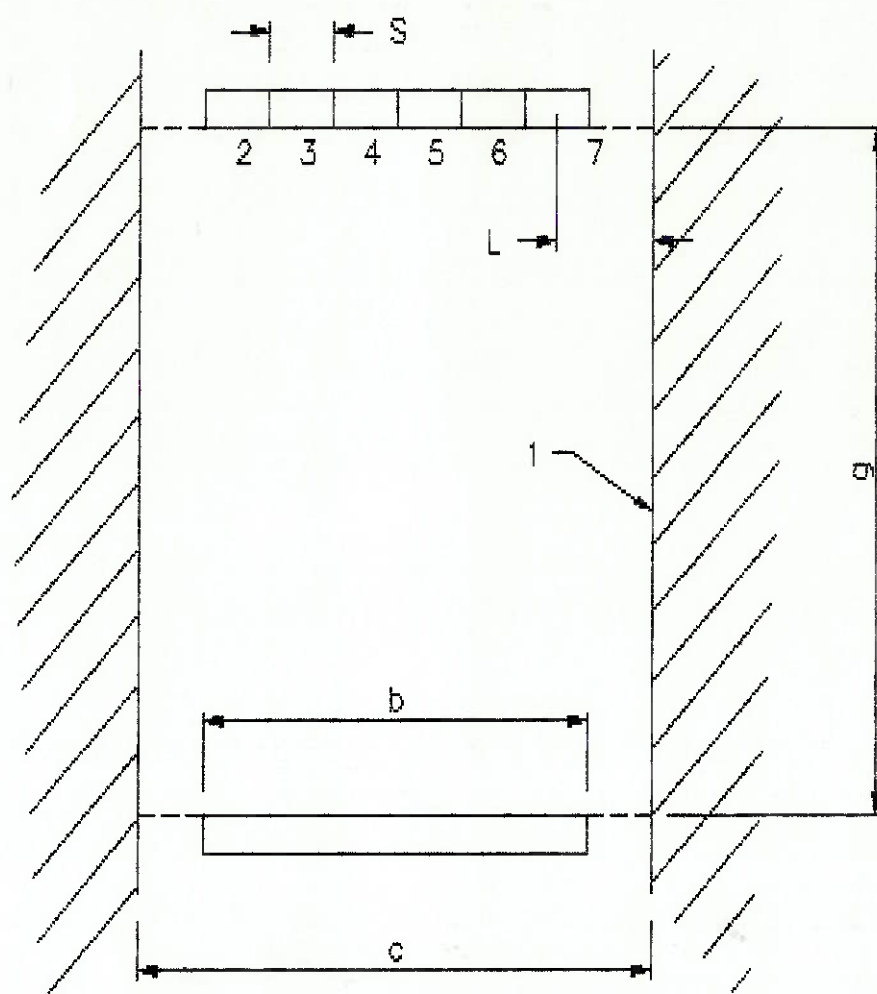


FIGURA 3.1.9 - ESQUEMA PARA CÁLCULO DOS FATORES DE FORMA
(CÂMARA CENTRAL)

3.2 MÉTODO DE DIFERENÇAS FINITAS APLICADO AO FIO

Com o auxílio do primeiro modelo, a partir da temperatura do ambiente interno, somos capazes de estimar temperaturas médias para a superfície da resistência e para a superfície das paredes metálicas (internas e externas). Estas temperaturas serão consideradas uniformes ao longo de toda a estufa, ao longo dos módulos (ver figura 3.2.1) ou ao longo de pequenos trechos de deslocamento do fio.

O modelo que vamos desenvolver nesta parte utiliza as temperaturas determinadas pelo primeiro para calcular a variação de temperatura do núcleo metálico, à medida que este avança através das zonas de aquecimento.

Algumas hipóteses devem ser enunciadas:

- despreza-se a condução longitudinal de calor no fio. Considera-se que as seções contíguas do fio estejam a temperaturas muito próximas, o que torna a taxa de calor transferida longitudinalmente desprezível em relação às demais taxas. O modelo torna-se bidimensional;

- não será considerada, para efeito de cálculo, a película de esmalte ao redor do núcleo metálico. Será considerado, como simplificação, um núcleo metálico com as dimensões originais e com as características emissivas da película;

- para efeito de trocas térmicas por radiação, todas as superfícies do fio serão consideradas como áreas

infinitesimais. Será adotado um fator de forma único, independentemente das dimensões particulares de cada fio;

- a seção do núcleo metálico será considerada como um único elemento à temperatura uniforme, devido às reduzidas dimensões e à alta condutividade térmica do material metálico (cobre ou alumínio);

- as temperaturas de equilíbrio (regime) da estufa serão consideradas constantes e uniformes por trechos. A dimensão destes trechos dependerá do intervalo de tempo escolhido e da velocidade da linha;

- o perfil metálico é suposto perfeitamente homogêneo;

- despreza-se as trocas por radiação com as paredes horizontais da estufa. Considera-se que as resistências isolam completamente a câmara por onde passa o cabo das outras câmaras menores, junto às paredes horizontais (ver figura 3.2.2);

- todos os fios são considerados de seção retangular, o que ocorre na realidade.

3.2.1 EQUAÇÕES

- Equação de troca por convecção:

$$\begin{aligned}
 q/L = & \{ 2 \cdot dy \cdot 1,42 \cdot [(T_{AR} - T_C)/dy]^{1/4} + \\
 & + dx \cdot 1,32 \cdot [(T_{AR} - T_C)/dx]^{1/4} + \\
 & + dx \cdot 0,61 \cdot [(T_{AR} - T_C)/dx^2]^{1/5} \} \cdot (T_{AR} - T_C) \quad (3.2.1.1)
 \end{aligned}$$

- Sendo: - T_c - temperatura do cabo ou fio;
 - dx - dimensão horizontal (maior) do fio;
 - dy - dimensão vertical (menor) do fio.

Observação: a notação anterior continua válida.

- Equação de troca por radiação (genérica):

$$q = \frac{S \cdot (T_{R,P}^4 - T_c^4)}{\frac{1 - E_{R,P}}{E_{R,P} \cdot A_{R,P}} + \frac{1}{F_{R,P-C} \cdot A_{R,P}} + \frac{1 - E_c}{E_c \cdot A_c}} \quad (3.2.1.2)$$

$$F_{R,P-C} \cdot A_{R,P} = F_{C-R,P} \cdot A_c \quad (3.2.1.3)$$

Adotando $ds = dx$ ou $ds = dy$:

$$q/L = \frac{S \cdot (T_{R,P}^4 - T_c^4)}{\frac{1 - E_{R,P}}{E_{R,P} \cdot (b,g)} + \frac{1}{F_{C-R,P} \cdot ds} + \frac{1 - E_c}{E_c \cdot ds}}$$

$$q/L = \frac{ds \cdot S \cdot (T_{R,P}^4 - T_c^4)}{\frac{1}{F_{C-R,P}} + \frac{1 - E_c}{E_c} + \frac{1 - E_{R,P}}{E_{R,P}} \cdot \frac{ds}{(b,g)}} \quad (3.2.1.4)$$

3.2.2 ANÁLISE DOS FATORES DE FORMA

Segundo a figura 3.2.3, cada superfície do fio troca calor por radiação com outras três superfícies da estufa. Devemos então calcular os quatro fatores de forma que nos interessam.

- Superfície Horizontal (dx):

De acordo com os ábacos da página E 2.5, referência 2.

a) planos paralelos:

$$D = g/2, L = c/2, R_2 > 10, R_1 = 0,40 \text{ e } F_{1-2} = 0,0925$$

$$\text{Com o elemento } dA_1 \text{ centrado em } 4.A_2: F_{1-2\text{total}} = 0,37$$

Observação: foi adotada a notação da referência 2, F_{1-2} equivale a F_{C-R} . O fio foi considerado centrado na estufa, o que a rigor não ocorre. Nos bordos teríamos $F_{1-2\text{total}}$ aproximadamente duas vezes F_{1-2} , mas para simplificar nos cálculos usaremos apenas um fator total como foi calculado. Caso contrário seríamos obrigados a utilizar a equação para cálculo de F_{1-2} e obter cada fator de acordo com a progressão do elemento no interior da estufa. Verifica-se ainda nas figuras da referência que a partir do valor 3 para R_2 , os fatores de forma são praticamente constantes. Portanto, pode-se desprezar os bordos.

O fator de forma calculado anteriormente considera que o elemento de área troca calor com toda a superfície superior. Mas nos interessa o fator de forma do elemento à resistência, ou seja:

$$L = b/2, R_1 = 0,254, F_{1-2} = 0,06625 \text{ e } F_{1-2\text{total}} = 0,265$$

b) planos perpendiculares:

$$D = c/2, L = g/2, R_2 > 10, R_1 = 2,48 \text{ e } F_{1-2} = 0,1575$$

$$F_{1-2\text{total}} = F_{C-P} = 2 \cdot 0,1575 = 0,315$$

Para verificar a validade dos cálculos basta somar os fatores de forma calculados para uma superfície horizontal, de modo que se construa uma câmara fechada ao redor do elemento de área. O resultado deve ser igual a 1:

$$0,37 + 0,315.2 = 0,37 + 0,63 = 1,00$$

- Superfície Vertical (dy):

a) planos paralelos:

$$D = c/2, L = g/2, R_1 = 2,48, R_2 > 10 \text{ e } F_{1-2} = 0,233$$

$$F_{1-2\text{total}} = 0,93$$

b) planos perpendiculares:

- considerando trocas com c:

$$D = g/2, L = c/2, R_2 > 10, R_1 = 0,40 \text{ e } F_{1-2} = 0,0175$$

$$F_{1-2\text{total}} = 2.0,0175 = 0,035$$

- considerando trocas com b:

$$D = g/2, L = b/2, R_2 > 10, R_1 = 0,254 \text{ e } F_{1-2} = 0,00875$$

$$F_{1-2\text{total}} = 0,0175$$

Fazendo a verificação:

$$0,93 + 2.0,035 = 0,93 + 0,07 = 1,00$$

Por se tratar de trocas com a superfície b, utilizaremos os fatores de forma referentes a esta superfície.

3.2.3 SISTEMA RESULTANTE

Não se trata de um sistema, mas de uma única equação, pois consideramos apenas um elemento na análise. Desta forma:

$$q_{\text{rad}} + q_{\text{conv}} = \text{variação de energia interna} \quad (3.2.3.1)$$

- Troca por radiação, superfícies horizontais:

$$q/L = \frac{dx \cdot S \cdot (T_R^4 - T_C^4)}{\frac{1}{F_{C-R}} + \frac{1 - E_C}{E_C} + \frac{1 - E_R}{E_R} \cdot \frac{dx}{b}} + \frac{2 \cdot dx \cdot S \cdot (T_P^4 - T_C^4)}{\frac{1}{F_{C-P}} + \frac{1 - E_C}{E_C} + \frac{1 - E_P}{E_P} \cdot \frac{dx}{(g/2)}} \quad (3.2.3.2)$$

- Troca por radiação, superfícies verticais:

$$q/L = \frac{dy \cdot S \cdot (T_P^4 - T_C^4)}{\frac{1}{F_{C-P'}} + \frac{1 - E_C}{E_C} + \frac{1 - E_P}{E_P} \cdot \frac{dy}{g}} + \frac{2 \cdot dy \cdot S \cdot (T_R^4 - T_C^4)}{\frac{1}{F_{C-R'}} + \frac{1 - E_C}{E_C} + \frac{1 - E_R}{E_R} \cdot \frac{dy}{(b/2)}} \quad (3.2.3.3)$$

- Troca por convecção em todo o perímetro: ver equação (3.2.1.1).

Chamaremos:

$$F1 = \frac{dx.S}{\frac{1}{F_{C-R}} + \frac{1 - E_C}{E_C} + \frac{1 - E_R}{E_R} \frac{dx}{b}} \quad (3.2.3.4)$$

$$F2 = \frac{dx.S}{\frac{1}{F_{C-P}} + \frac{1 - E_C}{E_C} + \frac{1 - E_P}{E_P} \frac{dx}{(g/2)}} \quad (3.2.3.5)$$

$$F3 = \frac{dy.S}{\frac{1}{F_{C-P'}} + \frac{1 - E_C}{E_C} + \frac{1 - E_P}{E_P} \frac{dy}{g}} \quad (3.2.3.6)$$

$$F4 = \frac{dy.S}{\frac{1}{F_{C-R'}} + \frac{1 - E_C}{E_C} + \frac{1 - E_R}{E_R} \frac{dy}{(b/2)}} \quad (3.2.3.7)$$

Voltando à equação (3.2.3.1):

$$2.(F1 + 2.F4).(T_R^4 - T_C^4) + 2.(F3 + 2.F2).(T_P^4 - T_C^4) + (3.2.1.1) = \text{VariaçãoEnergiaInterna/L} \quad (3.2.3.8)$$

$$VEI/L = d.c.dx.dy.(T_C^f - T_C^i)/dt \quad (3.2.3.9)$$

- Sendo:
- T_C^f - temperatura final no cabo (fio);
 - T_C^i - temperatura inicial no cabo (fio);
 - d - densidade do núcleo metálico;
 - c - calor específico do núcleo metálico;
 - dt - intervalo de tempo em que o cabo fica exposto à trocas térmicas, desde T_C^i até T_C^f ;
 - VEI - variação de energia interna do elemento.

3.2.4 ANÁLISE DO INTERVALO DE CONVERGÊNCIA

A análise transitória de troca térmica com o fio não pode contrariar a Segunda Lei da Termodinâmica. De uma maneira simplificada, esta lei estabelece: o fluxo de calor sempre ocorre do corpo de maior temperatura para o corpo de menor temperatura, se não houver nenhuma intervenção externa.

O nosso modelo representa o aquecimento de um núcleo metálico. A cada intervalo de tempo admitido, a temperatura do núcleo metálico se eleva até que esta se iguale à temperatura do ar. Se adotarmos um intervalo de tempo muito grande a quantidade de calor transferida ao fio pode ser suficiente para elevar a sua temperatura (T_c^f) acima da temperatura do ar, ou de corpos que cedam calor a este. Isto implicaria em transferência espontânea de calor do corpo de menor temperatura para o corpo de maior temperatura. Além de violar o Segundo Princípio da Termodinâmica isto torna a resolução dos sistemas de equações instável. Portanto deve-se limitar o máximo intervalo de tempo (dt).

Retomando a equação (3.2.3.8):

$$\begin{aligned} & 2.(F1 + 2.F4).(T_R^4 - T_c^4) + 2.(F3 + 2.F2).(T_P^4 - T_c^4) + \\ & + \{2.dy.1,42.[(T_{AR} - T_c)/dy]^{1/4} + dx.1,32.[(T_{AR} - T_c)/dx]^{1/4} + \\ & + dx.0,61.[(T_{AR} - T_c)/dx^2]^{1/5}\} . (T_{AR} - T_c) = \\ & = d.c.dx.dy.(T_c^f - T_c^i)/dt \end{aligned} \quad (3.2.4.1)$$

$$\text{Sendo:} \quad FF = d.c.dx.dy/dt \quad (3.2.4.2)$$

$$T_c^i = T_c$$

$$HA = \{2.dy.1,42.[(T_{AR} - T_c)/dy]^{1/4} + \\ + dx.1,32.[(T_{AR} - T_c)/dx]^{1/4} + dx.0,61.[(T_{AR} - T_c)/dx^2]^{1/5}\} \\ (3.2.4.3)$$

Resulta:

$$2.(F1 + 2.F4).(T_R^4 - T_c^4) + 2.(F3 + 2.F2).(T_P^4 - T_c^4) + \\ + HA.(T_{AR} - T_c) = FF.(T_c^f - T_c)$$

Isolando os termos multiplicados por T_c :

$$- [2.(F1 + 2.F4).(T_R^2 + T_c^2).(T_R + T_c) + \\ + 2.(F3 + 2.F2).(T_P^2 + T_c^2).(T_P + T_c) + HA] + FF \geq 0$$

Se a equação acima for satisfeita não será violado o Segundo Princípio da Termodinâmica.

$$FF \geq 2.(F1 + 2.F4).(T_R^2 + T_c^2).(T_R + T_c) + \\ + 2.(F3 + 2.F2).(T_P^2 + T_c^2).(T_P + T_c) + HA \quad (3.2.4.4)$$

$$dt \leq d.c.dx.dy / \{2.(F1 + 2.F4).(T_R^2 + T_c^2).(T_R + T_c) + \\ + 2.(F3 + 2.F2).(T_P^2 + T_c^2).(T_P + T_c) + HA\} \quad (3.2.4.5)$$

Na equação acima verificamos que o intervalo de tempo a ser adotado é função das temperaturas envolvidas nas trocas térmicas com o núcleo metálico. A única temperatura conhecida é T_{AR} . T_P e T_R podem ser estimadas pelo primeiro modelo. Assim, a única incógnita fica sendo T_c .

No que se refere à radiação, quanto maior T_c menor será o intervalo de tempo admissível. Para o termo referente à

convecção, quanto menor T_c , menor o intervalo de tempo. Adotando T_c muito próxima de T_{AR} e depois de T_{AMB} encontramos dois valores distintos. O menor deles deve ser adotado. Podemos adiantar que o termo predominante é a radiação e o menor dos intervalos calculados é aquele que utiliza T_c próxima de T_{AR} .

3.2.5 RESOLUÇÃO DO SISTEMA

Com o primeiro modelo apresentado temos condições de estimar as temperaturas ao longo da estufa. Com os valores de T_R e T_P e com o cálculo do dt adequado podemos utilizar o segundo modelo (equação do transitório) para acompanhar o aquecimento de uma seção de fio através do equipamento.

Isolando o termo T_c^f na equação (3.2.4.3):

$$T_c^f = T_c + (1/FF) \cdot [2 \cdot (F1 + 2 \cdot F4) \cdot (T_R^4 - T_c^4) + 2 \cdot (F3 + 2 \cdot F2) \cdot (T_P^4 - T_c^4) + HA \cdot (T_{AR} - T_c)] \quad (3.2.5.1)$$

A equação acima fornece o valor da temperatura final do fio após este ser exposto às temperaturas T_R , T_P e T_{AR} durante um intervalo de tempo dt . O valor de T_c deve ser inicializado com a temperatura ambiente. Após cada intervalo de tempo o valor inicial (T_c) fica igual ao valor final (T_c^f). A seguir, novo valor deve ser calculado a partir da equação (3.2.5.1).

3.2.6 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

- Emissividade: o único valor novo é o da emissividade da resina de revestimento (isolação). Para esmaltes, gomas, lacas em geral temos:

$$0,80 < E_c < 0,99$$

- Calor Específico: dois materiais são preferencialmente utilizados como núcleo de fios esmaltados: cobre e alumínio. Não consideraremos as possíveis ligas nestes dados, tratando apenas dos metais puros.

- alumínio puro: $C_{p_{Al}} = 896 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$

- cobre puro: $C_{p_{Cu}} = 383,1 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$

- Densidade: o mesmo continua valendo.

- alumínio puro: 2707 kg/m^3

- cobre puro: 8954 kg/m^3

Observação: todas as propriedades correspondem à temperatura de 20°C .

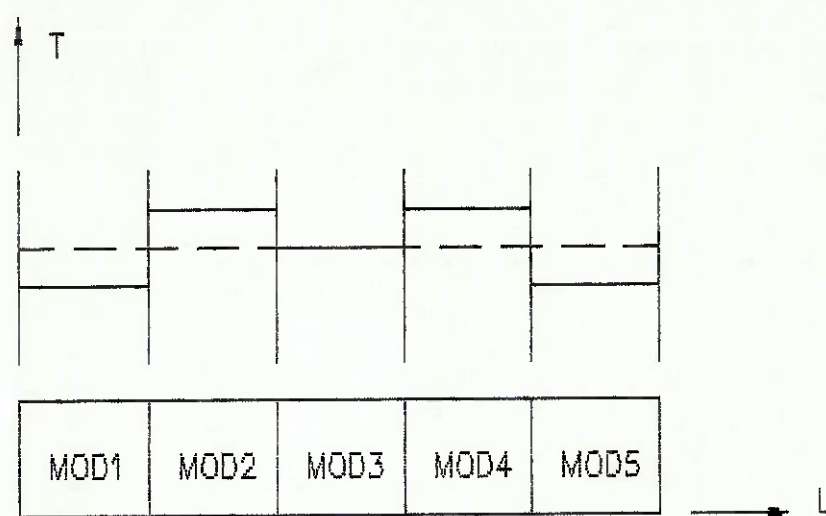


FIGURA 3.2.1 - RESSALTOS DE TEMPERATURA NOS MÓDULOS
A curva tracejada representa uma temperatura média ao longo de toda a estufa. As curvas contínuas representam saltos individuais de temperatura em cada módulo.

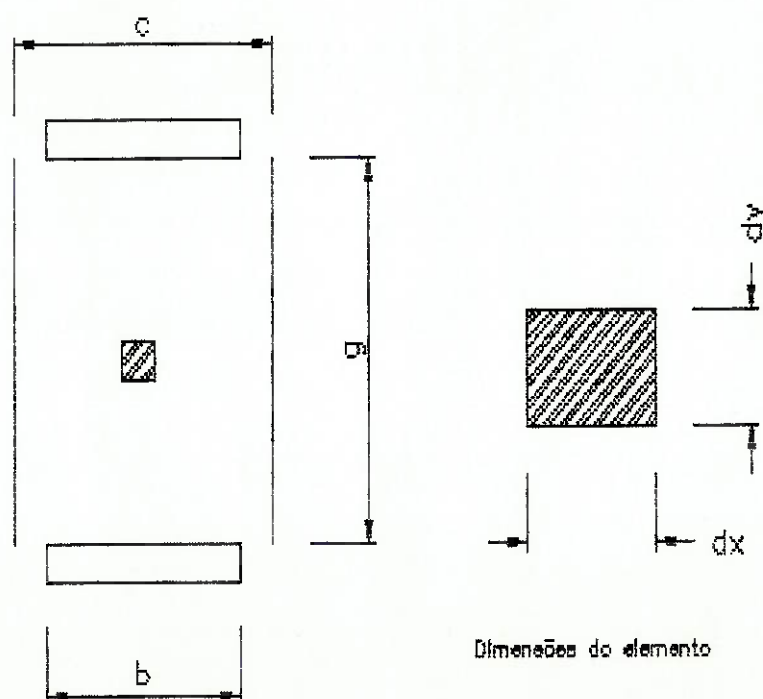


FIGURA 3.2.2 - SUPERFÍCIES CONSIDERADAS PARA TROCA POR RADIAÇÃO

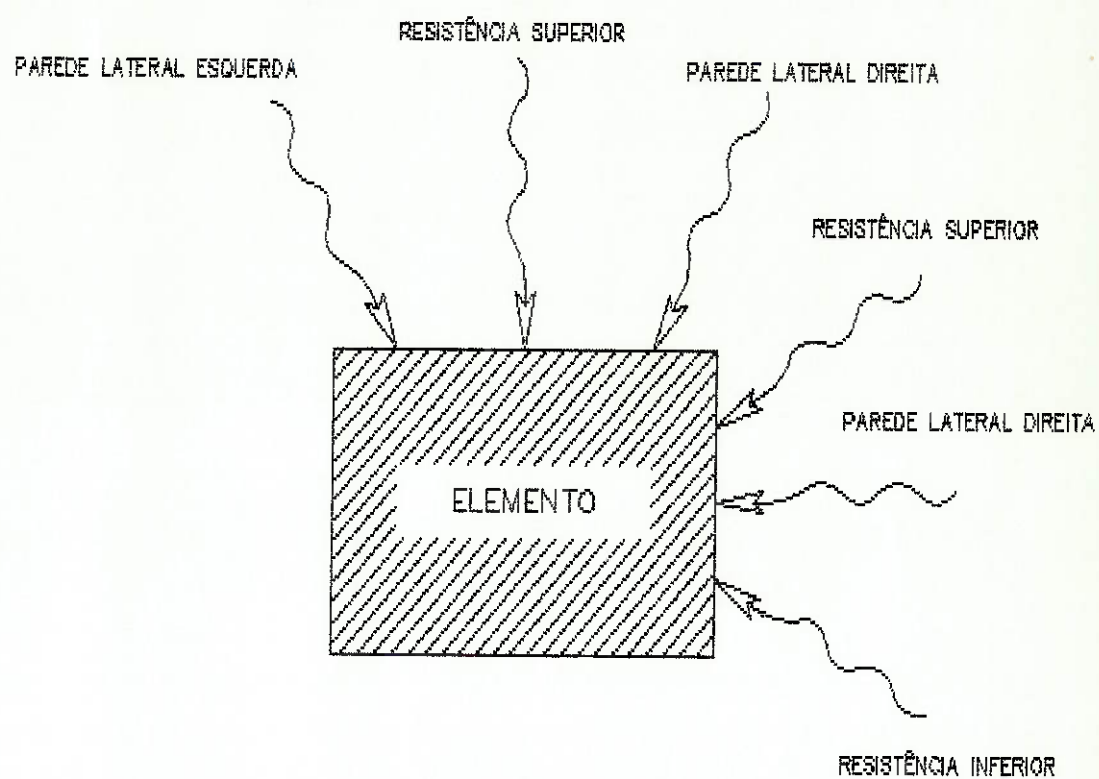


FIGURA 3.2.3 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO FLUXO DE CALOR POR RADIÇÃO EM CADA FACE DO ELEMENTO DE FIO

3.3 INCLUSÃO DO FIO AO MODELO DA ESTUFA

Partimos agora para uma modelagem mais completa da estufa, pois incluiremos o fio ao sistema. Isto causará alterações nos valores calculados para as temperaturas da resistência e da parede através do primeiro modelo.

Este novo modelo assume que, para uma determinada seção ao longo do equipamento, além da temperatura do ar interno também conhecemos a temperatura do núcleo metálico. As demais temperaturas de equilíbrio são calculadas (T_R e T_P), bem como a potência perdida por metro de estufa (sempre em regime permanente).

As hipóteses continuam as mesmas estabelecidas para os dois modelos anteriores.

Na figura 3.3.1 podemos visualizar a malha análoga de troca térmica, idealizada para parte da seção da estufa. A malha não está completa, como pode ser observado. Nela estão representados apenas o núcleo metálico, uma resistência, uma das paredes verticais e uma parede horizontal. A figura 3.3.4 apresenta os volumes de controle usados na análise.

Como se pode verificar existem diversos trechos em paralelo, já que por hipótese as temperaturas na estufa (pelo menos em uma seção) são uniformes. Assim, T_{AR} , T_P , T_{PINT} e T_{PEXT} são únicas.

Fazendo todas as somas das associações em paralelo chegamos ao esquema mostrado na figura 3.3.2. Este esquema

representa da maneira mais simplificada possível o circuito análogo de troca térmica.

O termo Pot refere-se à potência consumida pelo sistema em regime. Esta potência é eliminada de duas formas: potência "carregada" ou consumida pelo fio e potência perdida para o ambiente, respectivamente P_c e P_{AMB} . Portanto, a soma de P_c com P_{AMB} deve ser equivalente a Pot , se o sistema de equações resultante do circuito for resolvido de maneira correta. As únicas temperaturas a conhecer são T_{AMB} , T_{AR} e T_c . O conhecimento de T_{PE} (temperatura da parede externa) é irrelevante, pois associaremos as resistências R_1 e R_2 em série. Os termos Pot , P_c e P_{AMB} são desconhecidos. Logo, devemos encontrar duas equações que ignorem estes termos e relacionem as duas incógnitas T_P e T_R .

3.3.1 EQUAÇÕES

Segundo o esquema da figura 3.3.3 podemos definir as quantidades de calor transferidas em cada ramo da malha.

Analisando ao esquema verificamos que em apenas dois nós podemos montar equações onde encontramos apenas duas incógnitas (T_R e T_P). Os nós a que me refiro são: T_{AR} e T_P .

As equações destes nós servem para o cálculo de T_P e T_R . As equações nos demais nós fornecem as quantidades de potência consumidas.

Na imposição do sentido para os fluxos de calor na figura 3.3.3 foi admitido: $T_R > T_{AR} > T_P > T_C$. Lembramos que esta imposição é irrelevante e qualquer que seja o sentido imposto inicialmente obteremos o mesmo resultado.

- 1ª EQUAÇÃO (T_{AR}):

$$q_{R-AR} = q_{AR-C} + q_{AR-P} \quad (3.3.1.1)$$

$$\begin{aligned} & 2 \cdot \{ 2 \cdot a \cdot 1,42 \cdot [(T_R - T_{AR})/a]^{1/4} + b \cdot 1,32 \cdot [(T_R - T_{AR})/b]^{1/4} + \\ & \quad + b \cdot 0,61 \cdot [(T_R - T_{AR})/b^2]^{1/5} \} \cdot (T_R - T_{AR}) = \\ & = \{ 2 \cdot d \cdot 1,42 \cdot [(T_{AR} - T_P)/d]^{1/4} + c \cdot 1,32 \cdot [(T_{AR} - T_P)/c]^{1/4} + \\ & \quad + c \cdot 0,61 \cdot [(T_{AR} - T_P)/c^2]^{1/5} \} \cdot (T_{AR} - T_P) + \\ & + \{ 2 \cdot dy \cdot 1,42 \cdot [(T_{AR} - T_C)/dy]^{1/4} + dx \cdot 1,32 \cdot [(T_{AR} - T_C)/dx]^{1/4} + \\ & \quad + dx \cdot 0,61 \cdot [(T_{AR} - T_C)/dx^2]^{1/5} \} \cdot (T_{AR} - T_C) \quad (3.3.1.2) \end{aligned}$$

- 2ª EQUAÇÃO (T_P):

$$q_{R-P} + q_{AR-P} = q_{P-AMB} + q_{P-C} \quad (3.3.1.3)$$

$$\begin{aligned} & (3.1.3.4) + (3.1.3.5) = (3.1.3.6) + \\ & + 2 \cdot [2 \cdot (3.2.3.5) + (3.2.3.6)] \cdot (T_P^4 - T_C^4) \quad (3.3.1.4) \end{aligned}$$

- 3ª EQUAÇÃO (T_R): potência consumida por metro de estufa.

$$Pot = q_{R-P} + q_{R-AR} + q_{R-C} \quad (3.3.1.5)$$

$$\begin{aligned} Pot = & (3.1.3.4) + 2 \cdot \{ 2 \cdot a \cdot 1,42 \cdot [(T_R - T_{AR})/a]^{1/4} + \\ & + b \cdot 1,32 \cdot [(T_R - T_{AR})/b]^{1/4} + \\ & + b \cdot 0,61 \cdot [(T_R - T_{AR})/b^2]^{1/5} \} \cdot (T_R - T_{AR}) + \\ & + 2 \cdot [(3.2.3.4) + 2 \cdot (3.2.3.7)] \cdot (T_R^4 - T_C^4) \quad (3.3.1.6) \end{aligned}$$

- 4ª EQUAÇÃO (T_c): potência "carregada" pelo fio.

$$P_c = q_{R-c} + q_{AR-c} + q_{P-c} \quad (3.3.1.7)$$

$$\begin{aligned} P_c = & 2.[(3.2.3.4) + 2.(3.2.3.7)].(T_R^4 - T_c^4) + \\ & + \{2.dy.1,42.[(T_{AR} - T_c)/dy]^{1/4} + dx.1,32.[(T_{AR} - T_c)/dx]^{1/4} + \\ & + dx.0,61.[(T_{AR} - T_c)/dx^2]^{1/5}\}.(T_{AR} - T_c) + \\ & + 2.[2.(3.2.3.5) + (3.2.3.6)].(T_P^4 - T_c^4) \end{aligned} \quad (3.3.1.8)$$

- 5ª EQUAÇÃO (T_{AMB}): potência perdida para o ambiente.

$$P_{AMB} = q_{P-AMB} = (3.1.3.6) \quad (3.3.1.9)$$

3.3.2 RESOLUÇÃO DO SISTEMA

Na equação (3.3.1.4) isolamos uma das incógnitas (T_R). Estima-se um valor inicial para T_P e obtém-se T_R . Depois, na equação (3.3.1.2), verifica-se a validade dos valores obtidos. Iterativamente chegamos aos valores de T_R e T_P que satisfaçam às duas equações do modelo de regime permanente.

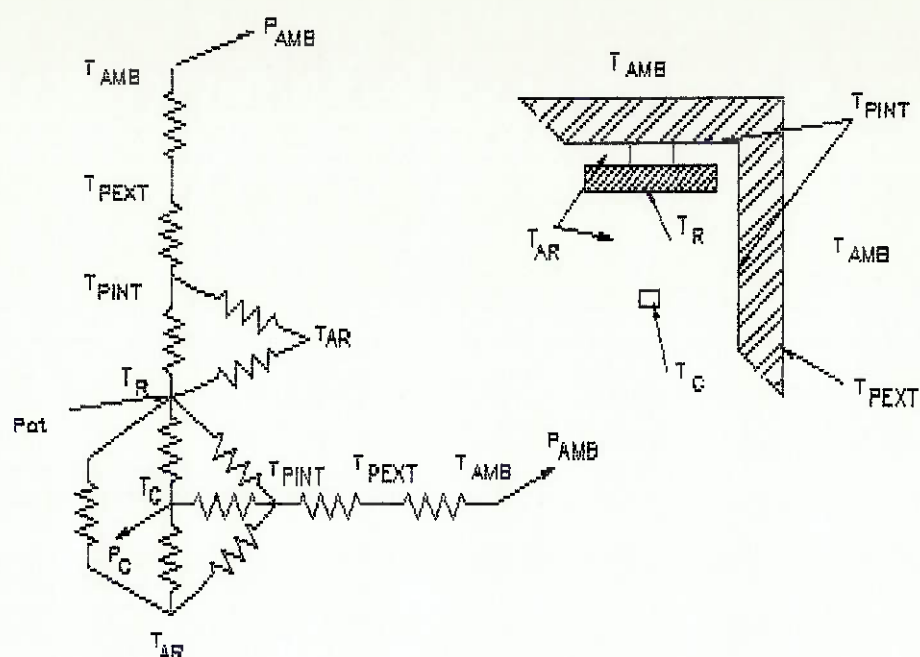


FIGURA 3.3.1 - CIRCUITO ELÉTRICO ANÁLOGO, REPRESENTANDO AS TROCAS TÉRMICAS DO MODELO GLOBAL

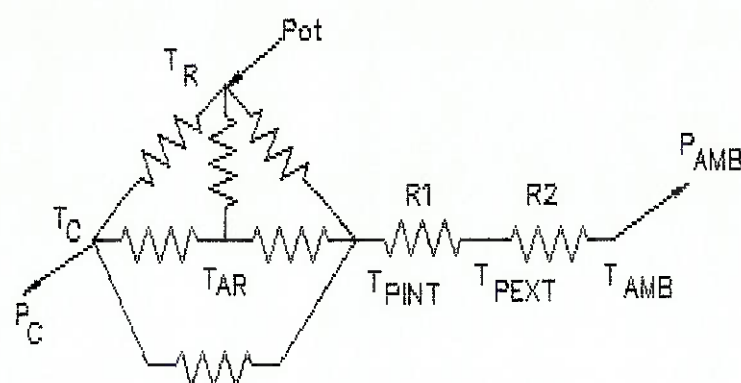


FIGURA 3.3.2 - REPRESENTAÇÃO SIMPLIFICADA DO CIRCUITO ANÁLOGO

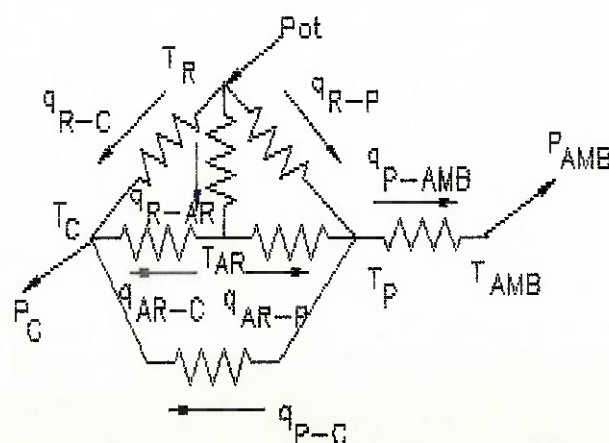


FIGURA 3.3.3 - FLUXO DE CALOR PELO SISTEMA

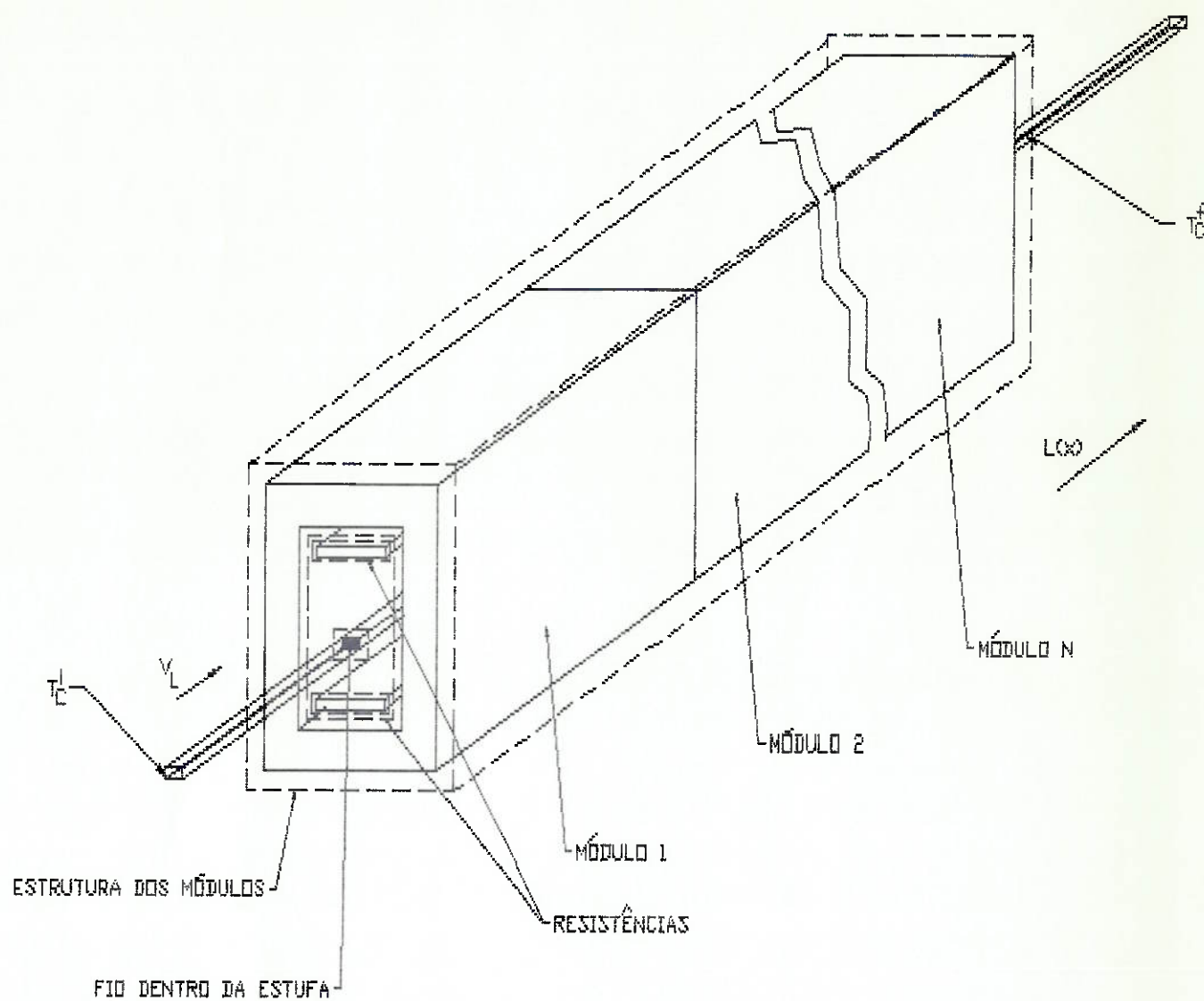


FIGURA 3.3.4 - REPRESENTAÇÃO DOS VOLUMES DE CONTROLE USADOS NA ANÁLISE

3.4 INTEGRAÇÃO DOS MODELOS

Neste momento já possuímos um modelo para cálculo de temperaturas em regime permanente e outro para cálculo da variação de temperaturas do núcleo metálico com o tempo (regime transitório).

Integraremos os dois modelos da seguinte maneira:

- no instante inicial ($t = 0$), suponho que uma seção plana de perfil metálico, à temperatura ambiente, esteja no início da estufa ($L = 0$);

- para esta configuração calculo T_R e T_P ($T_C = T_{AMB}$);

- depois do cálculo iterativo, passo para o modelo do transitório. Para um intervalo de tempo compatível com o Segundo Princípio da Termodinâmica considero T_R e T_P constantes e calculo a variação de temperatura do núcleo metálico (T_C^f);

- faço a temperatura inicial do fio (T_C) receber o valor da temperatura final (T_C^f) e retorno ao modelo para cálculo das temperaturas de equilíbrio;

- caso esteja na fronteira entre dois módulos com temperaturas internas diferentes (T_{AR}) estas também devem ser trocadas para o cálculo da nova condição de equilíbrio;

- continuo em "looping" até atingir um limite de tempo especificado, ou senão, possuindo a velocidade com que avança o núcleo metálico e o comprimento da estufa (ou módulo), posso determinar o instante em que o núcleo

abandona a estufa (ou módulo), obtendo a temperatura final do elemento;

- o procedimento do item anterior pode ser utilizado para uma troca automática da temperatura do interior de cada módulo, nos casos em que haja variação na regulação de temperatura dos mesmos.

Desta maneira, conseguimos obter a curva de aquecimento do fio ao longo do tempo de uma maneira discreta. A precisão dos cálculos tanto será maior quanto menor o intervalo de tempo adotado.

3.5 INCLUSÃO DA PELÍCULA DE ESMALTE NO CÁLCULO DO TRANSITÓRIO DO FIO

Anteriormente resolvemos não considerar a presença da película de esmalte ao redor do fio. Mas devido à alta capacidade térmica apresentada pelo material que a compõe, embora possua pequena massa, decidimos pela inclusão da mesma no modelo do transitório do fio.

As demais hipóteses antes estabelecidas continuam válidas, embora agora tenhamos um problema bidimensional que inclua a condução de calor da película de esmalte para o núcleo metálico.

Segundo a figura 3.5.1, dividiremos o núcleo do fio em cinco elementos. Mas consideraremos apenas uma temperatura para a película. Desta forma, desprezamos os gradientes de

temperatura ao longo da película e a consequente troca de calor entre partes da mesma.

De outra forma, por simetria, poderíamos admitir duas temperaturas, uma para as faces horizontais e outra para as faces verticais. Mas não seguiremos este caminho, embora a condução pela película seja preferencial na direção do metal. Para o nível de precisão que se exige deste modelo o acréscimo destes detalhes não contribuem significativamente para uma melhora do resultado. Admite-se para a película de esmalte uma espessura em torno de 0,05 mm.

3.5.1 EQUAÇÕES

- Película (superfície - T_s): consideraremos para o núcleo metálico as dimensões dx e dy . Para a película adotaremos a espessura e_{pel} .

Novas áreas de troca por radiação e convecção:

$$\text{- dimensão horizontal: } dh = dx + 2.e_{pel} \quad (3.5.1.1)$$

$$\text{- dimensão vertical: } dv = dy + 2.e_{pel} \quad (3.5.1.2)$$

Nas regiões onde há condução de calor será desprezado o acréscimo de área proveniente da presença da película de resina, já que a área em contato com o metal permanece a mesma.

Nas equações (3.2.3.4), (3.2.3.5), (3.2.3.6) e (3.2.3.7) devemos substituir dx e dy por dh e dv ,

respectivamente. E_c passa a ser a emissividade da superfície que possui temperatura T_c (T_s).

Na equação (3.2.3.8):

$$2.(F1 + 2.F4).(T_R^4 - T_C^4) + 2.(F3 + 2.F2).(T_P^4 - T_C^4) + \\ + \{2.dv.1,42.[(T_{AR} - T_C)/dv]^{1/4} + dh.1,32.[(T_{AR} - T_C)/dh]^{1/4} + \\ + dh.0,61.[(T_{AR} - T_C)/dh^2]^{1/5}\} .(T_{AR} - T_C) - q_{s-N} = \\ = d_s.c_s.A_s.(T_c^f - T_c^i)/dt \quad (3.5.1.3)$$

Sendo: - q_{s-N} - calor cedido pela superfície ao núcleo metálico;

- d_s - densidade do material da superfície;

- c_s - calor específico do material da superfície;

- A_s - área da seção transversal do perfil esmaltado.

$$A_s = 2 \cdot \left[\frac{dx + (dx + 2.e_{pel})}{2} \cdot e_{pel} + \frac{dy + (dy + 2.e_{pel})}{2} \cdot e_{pel} \right]$$

$$A_s = e_{pel} \cdot (dx + dh + dy + dv) \quad (3.5.1.4)$$

- Núcleo metálico (T_N):

- Taxa de calor transmitida na direção vertical:

$$q/L = (T_s - T_N)/Req_{VERT} = (T_c - T_N)/Req_{VERT} \quad (3.5.1.5)$$

$$Req_{VERT} = \frac{dy/2}{k_N \cdot dx} + \frac{e_{pel}}{k_s \cdot dx} = \frac{1}{F7} \quad (3.5.1.6)$$

- Taxa de calor transmitida na direção horizontal:

$$Re_{q_{HOR}} = \frac{dx/2}{k_N \cdot dy} + \frac{e_{pel}}{k_s \cdot dy} = \frac{1}{F8} \quad (3.5.1.7)$$

- Calor cedido ao núcleo:

$$q_{s-N} = 2 \cdot F7 \cdot (T_s - T_N) + 2 \cdot F8 \cdot (T_s - T_N) \quad (3.5.1.8)$$

- Equação do transitório do núcleo:

$$q_{s-N} = d_N \cdot c_N \cdot dx \cdot dy \cdot (T_N^f - T_N^i) / dt \quad (3.5.1.9)$$

Sendo: - d_N - densidade do metal do núcleo;

- c_N - calor específico do metal do núcleo;

- k_N - condutividade térmica do metal do núcleo;

- k_s - condutividade térmica do material de revestimento.

3.5.2 ANÁLISE DO INTERVALO DE CONVERGÊNCIA

Nas equações (3.5.1.3) e (3.5.1.9) são feitas referências ao intervalo de tempo (dt). Para cada uma delas encontraremos um valor de dt limite, sendo o menor deles o valor que deve ser obedecido na resolução das duas equações. Ver item 3.2.4

- Superfície:

$$FS = d_s \cdot c_s \cdot A_s / 2 \cdot dt \quad (3.5.1.10)$$

Isolando os coeficientes de T_c (T_s), como no item 3.2.4:

$$\begin{aligned}
 FS \geq & (F1 + 2.F4).(T_R^2 + T_C^2).(T_R + T_C) + \\
 & + (F3 + 2.F2).(T_P^2 + T_C^2).(T_P + T_C) + \\
 & + dv.1,42.[(T_{AR} - T_C)/dv]^{1/4} + \\
 & + (dh/2).1,32.[(T_{AR} - T_C)/dh]^{1/4} + \\
 & + (dh/2).0,61.[(T_{AR} - T_C)/dh^2]^{1/5} + (F7 + F8) \quad (3.5.1.11)
 \end{aligned}$$

Na equação acima basta isolar dt do termo FS para obtermos o limite do intervalo de tempo a adotar.

$$\begin{aligned}
 dt \leq & (d_s.c_s.A_s)/\{2.[(F1 + 2.F4).(T_R^2 + T_C^2).(T_R + T_C) + \\
 & + (F3 + 2.F2).(T_P^2 + T_C^2).(T_P + T_C) + \\
 & + dv.1,42.[(T_{AR} - T_C)/dv]^{1/4} + \\
 & + (dh/2).1,32.[(T_{AR} - T_C)/dh]^{1/4} + \\
 & + (dh/2).0,61.[(T_{AR} - T_C)/dh^2]^{1/5} + (F7 + F8)]\} \quad (3.5.1.12)
 \end{aligned}$$

- Núcleo metálico:

$$FN = d_N.c_N.dx.dy/2.dt \quad (3.5.1.13)$$

Seguindo o mesmo procedimento:

$$FN \geq F7 + F8$$

$$dt \leq (d_N.c_N.dx.dy)/[2.(F7 + F8)] \quad (3.5.1.14)$$

3.5.3 RESOLUÇÃO DO SISTEMA

Este novo modelo de transitório deve ser incorporado ao modelo de regime permanente e ser resolvido de maneira semelhante à descrita no item 3.4. Deve-se dar prioridade ao menor dos intervalos de tempo calculados, inclusive adotando intervalos menores que o limite, caso seja conveniente.

3.5.4 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

O novo modelo requer alguns dados que ainda não foram definidos.

- Condutividade Térmica:

- alumínio puro: 204 W/m.°C (20°C)

206 W/m.°C (100°C)

215 W/m.°C (200°C)

- cobre puro: 386 W/m.°C (20°C)

379 W/m.°C (100°C)

374 W/m.°C (200°C)

- polímeros (valor médio para não expandidos):

$k = 0,2 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$

- Calor Específico:

- polímeros (resinas): $C_p = 1400 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$

- Densidade:

- polímeros: $d = 1150 \text{ kg/m}^3$

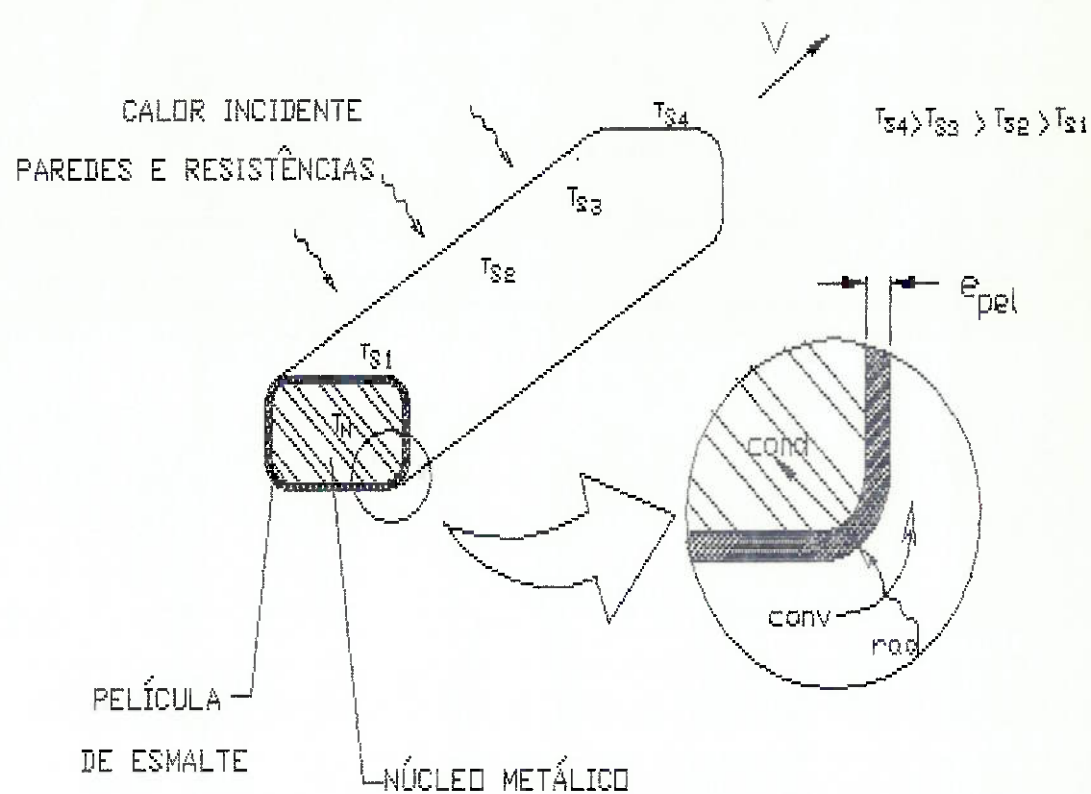


FIGURA 3.5.1 - ESQUEMA DE TROCAS TÉRMICAS INCLUINDO A PELÍCULA DE ESMALTE

4. SIMULAÇÕES: TABELAS E GRÁFICOS

O modelo desenvolvido permite que realizemos simulações do comportamento do fio ao longo da estufa. Junto aos anexos encontramos duas cópias de programas para microcomputador construídos a partir das equações apresentadas anteriormente. Maiores detalhes podem ser conhecidos no item 7.1.

Através destas simulações podemos estimar configurações de regulação de n módulos, com n temperaturas diferentes, sendo o comprimento individual de cada um estabelecido, bem como a velocidade da linha de produção, as dimensões do fio e seu material básico.

O objetivo inicial é obter um modelo que permita determinar o ponto ótimo de funcionamento do conjunto de estufas já existente. Isto em função das características do revestimento do fio: "gel-time", temperatura de início de cura, temperatura do teste Koffler e Temperatura de pós-cura.

Assim, em um primeiro trecho da linha haveria aquecimento para a fusão do isolante. A zona central da estufa seria a zona de cura, onde o cabo ficaria submetido a uma temperatura praticamente constante, próxima à do teste Koffler (ver exemplo de simulação nos anexos), durante um intervalo de tempo equivalente a 167% do "gel-time" (este é um dado que varia muito, temos resinas nas classes de 15, 30, 60 e até 240 segundos). Os melhores compostos do ponto

de vista da produção são os de "gel-time" mais baixo. Posteriormente a temperatura do fio seria elevada para níveis de pós-cura.

O segundo objetivo é alterar as características geométricas do problema e simular estufas semelhantes mas não idênticas (geometricamente) às já existentes. Neste ponto podem ser trocados fatores de forma e dados para a seção dos módulos (através de edição do programa).

Quanto ao nosso primeiro objetivo, o conhecimento de um ponto de calibração ótimo teórico próximo da realidade permite que os testes de partida do equipamento sejam em número mais reduzido, havendo economia em início de produção. O ponto ótimo real será obviamente acertado com testes do próprio equipamento, mas um resultado positivo surgirá mais rapidamente, já que partiu-se de um valor inicial bem avaliado e não da completa incerteza (caso os operadores não possuam experiência passada no processo).

Desta maneira, calibrando o modelo para que ele represente mais fielmente os resultados medidos experimentalmente, temos condições de evitar perdas por sucateamento de material em início de produção.

4.1 TABELAS

Como pode ser verificado nos anexos, as tabelas fornecem a potência consumida por metro de estufa em

diversos trechos (seções) dos módulos. O comprimento do trecho depende da velocidade escolhida para a simulação e do intervalo de tempo adotado. Mas para comprimentos muito pequenos este valor na prática não varia, pois não possuímos uma resistência pontual e sim discreta, com um comprimento definido. Além disso, em nossas hipóteses consideramos a temperatura constante na superfície da resistência. Não devemos nos preocupar com isto pois a variação no valor das temperaturas e das potências consumidas ao longo do equipamento são pequenas (para trechos curtos de estufa). Podemos ver isto através da equação:

$$V_L = L/I_t \quad \text{ou} \quad I_t = L/V_L \quad (4.1.1)$$

Sendo: - V_L - velocidade da linha (uniforme);

- L - comprimento total da estufa ou de um módulo ou grupo de módulos;
- I_t - intervalo de tempo que uma seção de cabo leva para percorrer todo o módulo ou conjunto de módulos.

Nos programas de simulação desenvolvidos (ver 7.1) não levamos em consideração a película de esmalte pelos seguintes motivos:

- a capacidade térmica da película por sua reduzida espessura, não reduz em muito a temperatura calculada para o núcleo metálico. A temperatura da superfície (T_s é a

temperatura que nos interessa, pois queremos analisar a cura do revestimento) fica próxima à temperatura estimada com um modelo mais simplificado. Difere apenas em cerca de 5°C para temperaturas da ordem de 240°C (menos de 2,5% de erro);

- não consideramos a energia liberada no processo de cura (ver referência 3, página 164) que sabemos ser exotérmico. Assim, um menor valor da temperatura calculada em relação à medida pode ser devido à desconsideração deste fato. De uma certa forma, desprezando a capacidade térmica da resina ajudamos a corrigir o valor da temperatura;

- o cálculo de dt para condução da superfície para o núcleo nos revela um valor muito inferior àqueles que costumávamos utilizar no modelo mais simples, obrigando-nos a um número de iterações maior. Este fato, relacionado à existência de mais algumas equações a solucionar, torna o processamento muito mais lento para acréscimos não significativos de precisão. Caso considerássemos o processo de cura, deveríamos separar núcleo e película (T_N e T_s , respectivamente).

A simulação permite a determinação de parâmetros de projeto relacionados à análise econômica do processo. Se aumentarmos demais a velocidade da linha, necessitaremos ou de uma estufa muito longa ou de trabalhar a uma temperatura muito elevada.

No primeiro caso, o custo do equipamento sobe à medida que aumentamos suas dimensões. No segundo caso, conforme aumentamos a temperatura de trabalho dos módulos, ocorre um

acréscimo da potência a ser instalada e conseqüentemente das perdas para o ambiente.

Através das tabelas podemos encontrar um tipo de geometria que minimize os custos de construção, adequando o equipamento ao arranjo físico da unidade de produção (espaço disponível na fábrica). Ao mesmo tempo, deve-se procurar a melhor combinação de parâmetros que minimize as perdas para o ambiente, aumentando a eficiência do processo.

Obviamente que uma análise econômica detalhada deve ser feita levando-se em consideração o custo de construção e manutenção do equipamento e do metro quadrado de área de fábrica, confrontados com gastos efetuados com energia elétrica.

Esta análise não será executada aqui pois foge do escopo inicial do trabalho, que é desenvolver uma ferramenta de dimensionamento de tais equipamentos.

4.2 GRÁFICOS

Como já foi descrito, com os dados relativos à matéria-prima de revestimento podemos simular diversos arranjos de temperatura ao longo da estufa, a fim de encontrar um perfil de temperaturas do fio ideal ao processo de cura. A idéia de produzir gráficos está relacionada à maior capacidade de visualização do fenômeno que estes dão em relação às tabelas. Dentre os exemplos de simulação (ver 7.2) podemos

encontrar um que relaciona "gel-time", temperatura de início de cura, temperatura do teste Koffler e temperatura de pós-cura (segundo o item 1).

Outros tipos de gráficos além de temperatura x tempo podem ser elaborados. Por exemplo, temperatura x comprimento de estufa. Neste tipo de gráfico podem ser desenhadas diversas curvas para velocidades diferentes, criando um manual de operação do equipamento para uma temperatura média de regulação. Estas curvas seriam relativas a uma mesma bitola e material de fio.

Para facilitar na análise econômica do processo podemos pensar em um gráfico que relacione potência média consumida por metro de estufa com temperatura de trabalho. Analisando curvas de potência total consumida e curvas de potência fornecida ao fio, podemos avaliar a eficiência de diversos tipos de equipamento e estimar a sua capacidade de produção (m/min).

Tais gráficos podem ser obtidos usando-se as equações básicas apresentadas no item 3 para a criação de programas específicos.

5. CONSTATAÇÕES EXPERIMENTAIS E ANÁLISE DO MODELO

Este capítulo apresenta as observações feitas durante os testes de produção, os principais resultados qualitativos e quantitativos e as conclusões que podem ser feitas a partir do modelo desenvolvido.

5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Este trabalho não tem a intenção de ser completo ou de fornecer uma representação exata do fenômeno estudado. A única pretensão do mesmo é apresentar um modelo simplificado que simula, com uma margem de erro tolerável, o processo de aquecimento do fio em uma linha de "Powder Coating".

Não foi possível calibrar o modelo adequadamente, pois perdi o acesso ao equipamento quando este foi transferido do CPqD para uma unidade industrial. Acompanhei três testes de produção, mas sempre para a mesma condição de operação e bitola de fio. Apenas foi possível coletar dados em um ponto, checando a temperatura de saída do fio esmaltado. É muito pouco avaliar um modelo que descreve uma curva por apenas um ponto. Mas como a temperatura final atingida é extremamente relevante no controle do processo, este se torna um dado que pode negar a validade do modelo.

Através dos testes foi possível perceber que:

- o conjunto de estufas reprojetoado é mais eficiente que o anterior devido à opção por resistências de cerâmica

ao invés de resistências tubulares de aço inoxidável. Isto foi avaliado através da comparação da temperatura de trabalho das resistências. Durante os testes, medi a temperatura na superfície da última resistência de cerâmica, que ficava em torno de 400°C. A temperatura que se costumava medir no outro equipamento era cerca de 550°C. Como o sistema trabalha a uma temperatura menor, reduz-se as perdas para o ambiente;

- a isolação foge aos padrões especificados pelo fabricante. Durante a montagem dos módulos pode ter ocorrido falhas de preenchimento ou excessiva compactação do material, mas as temperaturas projetadas (em função dos dados do fabricante) diferem brutalmente das medidas. Em função disto, adotamos um valor cerca de 200% do valor de catálogo para a condutividade do isolante;

- constatou-se que a qualidade do revestimento dos fios melhorou com o novo equipamento, possivelmente pelas melhores condições de troca térmica entre resistências e fio.

Várias outras modificações ainda podem ser feitas no modelo, portanto, este não é um trabalho definitivo, mas um primeiro passo para uma metodologia de projetos mais criteriosa.

Pode ser questionável se toda esta análise é necessária, pois embora haja perdas em início de produção até que se ache o ponto ideal de operação, o custo destas perdas é facilmente absorvido pelo volume produzido. Isto pode ser pensado para este processo analisando o sucateamento de

material, pois trata-se de um fio simples. Mas existem cabos que apenas são vendidos em lances de no mínimo 1000 m, pois as perdas na partida das máquinas (longas, até 100 m) são tão grandes que influem decisivamente no custo do cabo. Para lances curtos a empresa costuma perder concorrências.

Se não sabemos modelar processos simples com boa margem de acerto, não podemos partir para a modelagem de processos mais sofisticados, onde é economicamente justificável um estudo mais profundo.

Além disso, a modelagem pode revelar um ponto de eficiência máxima que é relevante em altas produções como a de fios esmaltados chatos, pois a energia gasta é parte significativa no custo de fabricação do produto. Isto pode determinar o crescimento da empresa no mercado, desde que seja mais eficiente que seus concorrentes e possa vender a um preço mais baixo.

5.2 CONCLUSÕES E PRINCIPAIS RESULTADOS

Nos testes de produção foi possível estabelecer uma medida da temperatura de saída do fio da estufa em torno de 240°C. A simulação nos fornece para as mesmas condições temperaturas da ordem de 220°C. Isto nos conduz a um erro final próximo de 10%, que é aceitável para um modelo simplificado.

Vale lembrar que o número de testes foi limitado e que uma conclusão final só pode ser tirada de uma bateria maior

de testes. Mas pelo menos, os 10% de erro são uma indicação de que o modelo se aproxima da realidade.

Através das simulações pode-se constatar, dentro da faixa de trabalho de projeto (200 a 550°C), que aumentos de 100% na temperatura de trabalho causam uma redução no tempo de exposição do fio em torno de 90%.

Usando uma temperatura de regulação duas vezes maior, consigo uma produção dez vezes maior. Logicamente a temperatura de trabalho é limitada pelos materiais que compõe a estufa, principalmente as resistências de cerâmica.

Outra limitação está no tempo de cura. Não adianta aumentar indefinidamente a temperatura de trabalho da estufa, pois a resina deve permanecer durante um certo período dentro dos limites da temperatura de cura. Este fato limita a produtividade para um mesmo comprimento de estufa.

Isto implica que a redução de 90% não inclui o tempo de cura, mas avalia apenas o intervalo de tempo que o fio leva para atingir a temperatura limite de cura.

Por outro lado, aumentos da temperatura de trabalho em 100%, provocam aumentos das perdas para o ambiente em 130%.

Analisando os dois resultados conclui-se que até o limite de operação da estufa, a eficiência do processo sempre aumenta à medida que elevamos a temperatura de trabalho da estufa e a velocidade da linha de produção.

O modelo permite concluir que a produtividade pode aumentar com um conseqüente aumento de eficiência.

6. BIBLIOGRAFIA

- (1) HOLMAN, J. P. - "TRANSFERÊNCIA DE CALOR", 1ª edição
McGraw Hill do Brasil, 1983
- (2) SILVA, R. B. - "MANUAL DE TERMODINÂMICA/TRANSMISSÃO DE CALOR", 6ª edição
Grêmio Politécnico - DLP, 1980
- (3) MAY & TANAKA - "EPOXY RESINS CHEMISTRY AND TECHNOLOGY",
1ª edição
Marcel Dekker, Inc., 1973
- (4) PIRELLI/CEC/GEDM - "MISTURAS POWDER COATING"
RT - 355/092
DEZEMBRO/1984
- (5) PIRELLI/CEC/GLP - "OBSERVAÇÕES TEÓRICAS E EXPERIMENTAIS
SOBRE O PROCESSO POWDER COATING"
RT - 353/017
SETEMBRO/1984
- (6) PIRELLI/CEC/GLP - "POWDER COATING - RESENHA SOBRE O
PROCESSO DE DEPOSIÇÃO ELETROSTÁTICA
DE PÓ"
RT - 353/017
ABRIL/1984

Observação: os relatórios técnicos da Pirelli Brasileira tem
circulação restrita.

7. ANEXOS

Como anexos serão apresentados os programas de simulação que utilizam as equações do modelo, bem como gráficos e tabelas gerados a partir destes programas.

7.1 PROGRAMAS

Nas páginas seguintes serão apresentados dois programas para microcomputador que utilizam a linguagem Pascal (Turbo Pascal - Borland International, Inc.). O primeiro dos programas calcula e apresenta uma tabela contendo: o intervalo de tempo de exposição do fio, a temperatura do núcleo metálico, a temperatura da resistência, a temperatura média da parede interna dos módulos, a potência consumida total, consumida pelo fio e perdida para o ambiente. Junto a estas colunas temos duas outras que mostram o erro ou resíduo obtido no cálculo de temperaturas e potências.

Procurou-se utilizar no programa a mesma notação empregada no modelo. Poucos dados são introduzidos. A maioria das constantes está definida dentro do programa e podem ser alteradas por edição. Durante a entrada de dados o programa calcula o máximo intervalo de tempo para o qual a equação do transitório vale. A seguir o usuário do programa introduz o intervalo de tempo que lhe for mais conveniente, obedecendo este limite. Não foram utilizadas as equações do

fio considerando a película, pois além de diminuir muito o máximo dt permitido, tornavam o programa muito mais lento para um acréscimo não significativo de precisão.

A estrutura básica dos dois programas é a mesma, alterando-se apenas a forma de apresentação da saída. O segundo programa utiliza um "pacote" gráfico (Turbo Graphix Toolbox - Borland) para gerar gráficos de temperatura do cabo ao longo do tempo. Veja os exemplos de simulação. Além desta curva são apresentadas as curvas de temperatura dos módulos (degraus) e nível de temperatura ambiente. Estes programas podem ser alterados para gerar gráficos de potência consumida e eficiência do processo.

```
program TabelasPowderCoating;
```

```
const
```

```
  S:real=5.669E-08;
  kCu:real=380;cCu:real=383;dCu:real=8954;
  kAl:real=210;cAl:real=896;dAl:real=2707;
  em:real=0.001;kinox:real=17.5;kaco:real=47;
```

```
var
```

```
  n,I:integer;
  Tmod:array[1..10] of real;
  Tamb,Tar,Tpext,L,V,dx,dy,a,b,c,d,e,f,g,Ec,Er,Ep:real;
  eiso,kiso:real;
  hl,hs,hi:real;
  Mat:char;
  Tp,Tr,Tc,Tof:real;
  Pot,Pc,Pamb:real;
  FdhR,FdhP,FdvR,FdvP:real;
  FRPhor,FRPvert:real;
  F1,F2,F3,F4,F5,F6,Req1,Req2,Req3:real;
  ko,cc,dc:real;
  Res,ResP:real;
  FF,dt,t,It,Contador:real;
```

```
label E1,E2,E3;
```

```
function R4(N:real):real;
```

```
begin
  R4:=EXP(0.25*LN(N));
end;
```

```
function R5(N:real):real;
```

```
begin
  R5:=EXP(0.2*LN(N));
end;
```

```
function P4D(var a,b:real):real;
```

```
begin
  P4D:=SQR(SQR(a))-SQR(SQR(b));
end;
```

```
function R4D(var a,b:real):real;
```

```
var AUX:real;

begin
  AUX:=ABS(a-b);
  R4d:=EXP(0.25*LN(AUX));
```

```

    end;

function ha(var L,T1,T2:real):real;
begin
    ha:=1.42*R4(abs((T1-T2)/L));
end;

function hb(var L,T1,T2:real):real;
begin
    hb:=1.32*R4(abs((T1-T2)/L));
end;

function hc(var L,T1,T2:real):real;
begin
    hc:=0.61*R5(abs((T1-T2)/SQR(L)));
end;

BEGIN

    ClrScr;
    writeln('');writeln('');writeln('POWDER COATING');
    writeln(1st);writeln(1st);writeln(1st,'POWDER COATING');
    writeln('');writeln('');writeln(1st);writeln(1st);
    write('Numero de modulos: ');
    readln(n);
    writeln(1st,'          Numero de modulos: ',n);
    for I:=1 to n do
        begin
            write('Temperatura de regulagem do modulo ',I,' (C): ');
            readln(Tmod[I]);
            writeln(1st,'          Temperatura de regulagem do modulo
',I,' (C): ',Tmod[I]:4:0);
            Tmod[I]:=Tmod[I]+273;
            if Tar<Tmod[I] then Tar:=Tmod[I];
        end;
        write('Material do nucleo - Aluminio (A) ou Cobre (C): ');
        readln(Mat);
        writeln(1st,'          Material do nucleo - Aluminio (A)
ou Cobre (C): ',Mat);
        write('Dimensao horizontal do fio (mm): ');
        readln(dx);
        writeln(1st,' Dimensao horizontal do fio (mm): ',dx:2:0);
        dx:=dx/1000;
        write('Dimensao vertical do fio (mm): ');
        readln(dy);
        writeln(1st,' Dimensao vertical do fio (mm): ',dy:2:0);
        dy:=dy/1000;
        write('Temperatura do ambiente (C): ');
        readln(Tamb);
        writeln(1st,' Temperatura do ambiente (C): ',Tamb:2:0);
        Tamb:=Tamb+273;
    end;

```

```

Tmod[I+1]:=Tamb;
write('Comprimento de cada modulo (m): ');
readln(L);
writeln(1st,' Comprimento de cada modulo (m): ',L:2:0);
write('Velocidade da linha (m/min): ');
readln(V);
writeln(1st,' Velocidade da linha (m/min): ',V:2:0);
V:=V/60;
It:=L/V;
a:=0.009;b:=0.060;c:=0.095;d:=0.300;e:=0.300;f:=0.500;
g:=0.236;
Tpext:=343;Ec:=0.95;Er:=0.90;Ep:=0.075;
Ec:=(1-Ec)/Ec;Er:=(1-Er)/Er;Ep:=(1-Ep)/Ep;
eiso:=0.100;kiso:=0.12;hl:=ha(f,Tpext,Tamb);
hs:=hb(e,Tpext,Tamb);hi:=hc(e,Tpext,Tamb);
FdhR:=0.265;FdhP:=0.315;FdvR:=0.0175;FdvP:=0.93;
FRPhor:=1.00;FRPvert:=0.445;
FdhR:=1/FdhR;FdhP:=1/FdhP;FdvR:=1/FdvR;FdvP:=1/FdvP;
FRPhor:=1/FRPhor;FRPvert:=1/FRPvert;
F1:=S*dx/(Ec+FdhR+Er*dx/b);F2:=S*dx/(Ec+FdhP+2*Ep*dx/g);
F3:=S*dy/(Ec+FdvP+Ep*dy/g);F4:=S*dy/(Ec+FdvR+2*Er*dy/b);
F5:=S*b/(Er+FRPhor+Ep*b/c);F6:=S*b/(Er+FRPvert+Ep*b/g);
Req1:=(em/(kinox*d))+((2*eiso)/(kiso*(d+f)))+(em/(kaco*f))
+(1/(hl*f));
Req2:=(em/(kinox*c))+((2*eiso)/(kiso*(c+e)))+(em/(kaco*e))
+(1/(hs*e));
Req3:=(em/(kinox*c))+((2*eiso)/(kiso*(c+e)))+(em/(kaco*e))
+(1/(hi*e));
Req1:=1/Req1;Req2:=1/Req2;Req3:=1/Req3;
if (Mat='a')or(Mat='A') then begin
    kc:=kAl;
    cc:=cAl;
    dc:=dAl;
    end
else begin
    kc:=kCu;
    cc:=cCu;
    dc:=dCu;
    end;
FF:=dc*cc*dx*dy/2;
Tr:=Tar+100;Tc:=0.99*Tar;Tp:=Tar-50;
dt:=(F1+2*F4)*(SQR(Tr)+SQR(Tc))*(Tr+Tc);
dt:=dt+(F3+2*F2)*(SQR(Tp)+SQR(Tc))*(Tp+Tc);
dt:=dt+(dy*ha(dy,Tar,Tc)+(dx/2)*(hb(dx,Tar,Tc)
+hc(dx,Tar,Tc)));
dt:=FF/dt;
writeln('Maximo intervalo de tempo permitido (s): ',
dt:6:3);
writeln(1st,'Maximo intervalo de tempo permitido (s): ',
dt:6:3);
write('Intervalo a ser adotado (s): ');
readln(dt);
writeln(1st,'Intervalo a ser adotado (s): ',dt:6:3);
FF:=FF/dt;

```

```

Tc:=Tamb;
t:=0;I:=1;Pot:=0;Pc:=0;Pamb:=0;ResP:=0;
repeat until KeyPressed;

writeln(1st);writeln(1st);writeln(1st);writeln(1st);
ClrScr;
writeln('    t(s)  Tc(C)  Tr(C)  Tp(C)  Res(W/m)  Pot(W/m)
Pc(W/m)  Pamb(W/m)  ResP(W/m)');
writeln(1st,'    t(s)  Tc(C)  Tr(C)  Tp(C)  Res(W/m)
Pot(W/m)  Pc(W/m)  Pamb(W/m)  ResP(W/m)');

while t<=n*It do begin
Contador:=(t/It);
if i<=Contador then I:=I+1;
Tar:=Tmod[I];Tp:=Tar-100;

    repeat
        E1:Tp:=Tp+10;
        Tr:=(2*Req1+Req2+Req3)*(Tp-Tamb)
        +2*(2*F2+F3)*(P4D(Tp,Tc));
        if Tp=Tar then goto E1
            else Tr:=(Tr-(2*d*ha(d,Tar,Tp)
+c*(hb(c,Tar,Tp)+hc(c,Tar,Tp)))*(Tar-Tp))/(2*(F5+2*F6));
        Tr:=SQR(SQR(Tp))+Tr;
        if Tr<=0 then begin
            goto E1;
        end
        else begin
            Tr:=R4(Tr);
        end;

Res:=(2*dy*ha(dy,Tar,Tc)+dx*(hb(dx,Tar,Tc)+hc(dx,Tar,Tc)))
*(Tar-Tc);

Res:=Res+(2*d*ha(d,Tar,Tp)+c*(hb(c,Tar,Tp)+hc(c,Tar,Tp)))
*(Tar-Tp);
        Res:=Res-2*(2*a*ha(a,Tr,Tar)
+b*(hb(b,Tr,Tar)+hc(b,Tr,Tar)))*(Tr-Tar);
        until Res<0;
        Tp:=Tp-10;
        repeat
            E2:Tp:=Tp+1;
            Tr:=(2*Req1+Req2+Req3)*(Tp-Tamb)
            +2*(2*F2+F3)*(P4D(Tp,Tc));
            if Tp=Tar then goto E2
                else Tr:=(Tr-(2*d*ha(d,Tar,Tp)
+c*(hb(c,Tar,Tp)+hc(c,Tar,Tp)))*(Tar-Tp))/(2*(F5+2*F6));
            Tr:=SQR(SQR(Tp))+Tr;
            if Tr<=0 then begin
                goto E2;
            end
            else begin
                Tr:=R4(Tr);
            end;

```

```
Res:=(2*dy*ha(dy,Tar,Tc)+dx*(hb(dx,Tar,Tc)+hc(dx,Tar,Tc)))
*(Tar-Tc);
```

```
Res:=Res+(2*d*ha(d,Tar,Tp)+c*(hb(c,Tar,Tp)+hc(c,Tar,Tp)))
*(Tar-Tp);
```

```
    Res:=Res-2*(2*a*ha(a,Tr,Tar)
+b*(hb(b,Tr,Tar)+hc(b,Tr,Tar)))*(Tr-Tar);
    until Res<0;
    Tp:=Tp-1;
    repeat
    E3:Tp:=Tp+0.1;
    Tr:=(2*Req1+Req2+Req3)*(Tp-Tamb)
+2*(2*F2+F3)*(P4D(Tp,Tc));
    if Tp=Tar then goto E3
    else Tr:=(Tr-(2*d*ha(d,Tar,Tp)
+c*(hb(c,Tar,Tp)+hc(c,Tar,Tp)))*(Tar-Tp))/(2*(F5+2*F6));
    Tr:=SQR(SQR(Tp))+Tr;
    if Tr<=0 then begin
        goto E3;
    end
    else begin
        Tr:=R4(Tr);
    end;
```

```
Res:=(2*dy*ha(dy,Tar,Tc)+dx*(hb(dx,Tar,Tc)+hc(dx,Tar,Tc)))
*(Tar-Tc);
```

```
Res:=Res+(2*d*ha(d,Tar,Tp)+c*(hb(c,Tar,Tp)+hc(c,Tar,Tp)))
*(Tar-Tp);
```

```
    Res:=Res-2*(2*a*ha(a,Tr,Tar)
+b*(hb(b,Tr,Tar)+hc(b,Tr,Tar)))*(Tr-Tar);
    until Res<0;
    Tcf:=(F1+2*F4)*P4D(Tr,Tc)+(F3+2*F2)*P4D(Tp,Tc);
    Tcf:=Tcf+(dy*ha(dy,Tar,Tc)+(dx/2)*(hb(dx,Tar,Tc)
+hc(dx,Tar,Tc)))*(Tar-Tc);
    Tcf:=Tc+(Tcf/FF);
    writeln(t:7:1,(Tc-273):7:1,(Tr-273):7:1,(Tp-273):7:1,
Res:7:2,Pot:10:1,Pc:8:1,Pamb:9:1,ResP:9:2);
    writeln(1st,' ',t:7:1,(Tc-273):7:1,(Tr-273):7:1,
(Tp-273):7:1,Res:7:2,Pot:10:1,Pc:8:1,Pamb:9:1,ResP:9:2);
    Pot:=P4D(Tr,Tp)*2*(F5+2*F6)+2*(2*a*ha(a,Tr,Tar)
+b*(hb(b,Tr,Tar)+hc(b,Tr,Tar)))*(Tr-Tar)
+2*(F1+2*F4)*P4D(Tr,Tc);
    Pc:=P4D(Tr,Tc)*2*(F1+2*F4)+(2*dy*ha(dy,Tar,Tc)
+dx*(hb(dx,Tar,Tc)+hc(dx,Tar,Tc)))*(Tar-Tc)
+P4D(Tp,Tc)*2*(2*F2+F3);
    Pamb:=(2*Req1+Req2+Req3)*(Tp-Tamb);
    ResP:=Pot-Pc-Pamb;
    t:=t+dt; Tc:=Tcf;
    end;
    writeln(1st);
```

END.

```

program GraficosPowderCoating;

{$I typedef.sys}
{$I graphix.sys}
{$I kernel.sys}
{$I windows.sys}
{$I axis.hgh}
{$I polygon.hgh}

procedure GeraTela;

const

    S:real=5.669E-08;
    kCu:real=380;cCu:real=383;dCu:real=8954;
    kAl:real=210;cAl:real=896;dAl:real=2707;
    em:real=0.001;kinox:real=17.5;kaco:real=47;

var

    LimPontos:integer;
    C1,C2,C3:plotarray;

    n,I,cont1,cont2:integer;
    Tmod:array[1..10] of real;
    Tamb,Tar,Tpext,L,V,dx,dy,a,b,c,d,e,f,g,Ec,Er,Ep:real;
    eiso,kiso:real;
    hl,hs,hi:real;
    Mat:char;
    dxx,dyv,Vl:string[2];
    Graf:string[100];
    Tp,Tr,Tc,Tcf:real;
    FdhR,FdhP,FdvR,FdvP:real;
    FRPhor,FRPvert:real;
    F1,F2,F3,F4,F5,F6,Req1,Req2,Req3:real;
    kc,cc,dc:real;
    Res:real;
    FF,dt,t,It,Contador:real;

label E1,E2,E3;

function R4(N:real):real;

begin
    R4:=EXP(0.25*LN(N));
end;

function R5(N:real):real;

begin
    R5:=EXP(0.2*LN(N));
end;

```

```

function P4D(var a,b:real):real;
begin
  P4D:=SQR(SQR(a))-SQR(SQR(b));
end;

function R4D(var a,b:real):real;
var AUX:real;
begin
  AUX:=ABS(a-b);
  R4d:=EXP(0.25*LN(AUX));
end;

function ha(var L,T1,T2:real):real;
begin
  ha:=1.42*R4(abs((T1-T2)/L));
end;

function hb(var L,T1,T2:real):real;
begin
  hb:=1.32*R4(abs((T1-T2)/L));
end;

function hc(var L,T1,T2:real):real;
begin
  hc:=0.61*R5(abs((T1-T2)/SQR(L)));
end;

begin
  LimPontos:=100;
  ClearScreen;
  writeln('');writeln('');
  writeln('POWDER COATING');
  writeln('');writeln('');
  write('Numero de modulos: ');
  readln(n);
  for I:=1 to n do
    begin
      write('Temperatura de regulagem do modulo ',I,' (C): ');
      readln(Tmod[I]);
      Tmod[I]:=Tmod[I]+273;
      if Tar<Tmod[I] then Tar:=Tmod[I];
    end;
  write('Material do nucleo - Aluminio (A) ou Cobre (C): ');
  readln(Mat);
  write('Dimensao horizontal do fio (mm): ');
  readln(dx);
  str(dx:2:0,dxx);dx:=dx/1000;
  write('Dimensao vertical do fio (mm): ');

```

```

readln(dy);
str(dy:2:0,dy);dy:=dy/1000;
write('Temperatura do ambiente (C): ');
readln(Tamb);
Tamb:=Tamb+273;
Tmod[I+1]:=Tamb;
write('Comprimento de cada modulo (m): ');
readln(L);
write('Velocidade da linha (m/min): ');
readln(V);
str(V:2:0,V1);V:=V/60;
It:=L/V;
a:=0.009;b:=0.060;c:=0.095;d:=0.300;e:=0.300;f:=0.500;
g:=0.236;
Tpext:=343;Ec:=0.95;Er:=0.90;Ep:=0.075;
Ec:=(1-Ec)/Ec;Er:=(1-Er)/Er;Ep:=(1-Ep)/Ep;
eiso:=0.100;kiso:=0.12;h1:=ha(f,Tpext,Tamb);
hs:=hb(e,Tpext,Tamb);hi:=hc(e,Tpext,Tamb);
FdhR:=0.265;FdhP:=0.315;FdvR:=0.0175;FdvP:=0.93;
FRPhor:=1.00;FRPvert:=0.445;
FdhR:=1/FdhR;FdhP:=1/FdhP;FdvR:=1/FdvR;FdvP:=1/FdvP;
FRPhor:=1/FRPhor;FRPvert:=1/FRPvert;
F1:=S*dx/(Ec+FdhR+Er*dx/b);F2:=S*dx/(Ec+FdhP+2*Ep*dx/g);
F3:=S*dy/(Ec+FdvP+Ep*dy/g);F4:=S*dy/(Ec+FdvR+2*Er*dy/b);
F5:=S*b/(Er+FRPhor+Ep*b/c);F6:=S*b/(Er+FRPvert+Ep*b/g);
Req1:=(em/(kinox*d))+((2*eiso)/(kiso*(d+f)))+(em/(kaco*f))
+(1/(h1*f));
Req2:=(em/(kinox*c))+((2*eiso)/(kiso*(c+e)))+(em/(kaco*e))
+(1/(hs*e));
Req3:=(em/(kinox*c))+((2*eiso)/(kiso*(c+e)))+(em/(kaco*e))
+(1/(hi*e));
Req1:=1/Req1;Req2:=1/Req2;Req3:=1/Req3;
Tr:=Tar+100;Tc:=0.99*Tar;Tp:=Tar-50;
if (Mat='a')or(Mat='A') then begin
    kc:=kAl;
    cc:=cAl;
    dc:=dAl;
    Graf:='POWDER COATING - TEMPERATURA
(C) x TEMPO (s) - ALUMINIO - '+dy+' x'+dxx+' mm - '+V1
+' m/min';
    end
else begin
    kc:=kCu;
    cc:=cCu;
    dc:=dCu;
    Graf:='POWDER COATING - TEMPERATURA
(C) x TEMPO (s) - COBRE - '+dy+' x'+dxx+' mm - '+V1
+' m/min';
    end;
FF:=dc*cc*dx*dy/2;
dt:=(F1+2*F4)*(SQR(Tr)+SQR(Tc))*(Tr+Tc);
dt:=dt+(F3+2*F2)*(SQR(Tp)+SQR(Tc))*(Tp+Tc);
dt:=dt+(dy*ha(dy,Tar,Tc)+(dx/2)*(hb(dx,Tar,Tc)
+hc(dx,Tar,Tc)));

```

```

    dt:=FF/dt;
    writeln('Maximo intervalo de tempo permitido (s): ',
dt:7:5);
    write('Intervalo adotado (s): ');
    readln(dt);
    FF:=FF/dt;
    Tc:=Tamb;
    t:=0;I:=1;cont1:=1;cont2:=1;

    while (t<=n*It) and (cont2<LimPontos) do begin
        Contador:=(t/It);
        if I<=Contador then I:=I+1;
        Tar:=Tmod[I];Tp:=Tar-100;
        repeat
            E1:Tp:=Tp+10;
            Tr:=(2*Req1+Req2+Req3)*(Tp-Tamb)
+2*(2*F2+F3)*(P4D(Tp,Tc));
            if Tp=Tar then goto E1
                else Tr:=(Tr-(2*d*ha(d,Tar,Tp)
+c*(hb(c,Tar,Tp)+hc(c,Tar,Tp)))*(Tar-Tp))/(2*(F5+2*F6));
            Tr:=SQR(SQR(Tp))+Tr;
            if Tr<=0 then begin
                goto E1;
            end
            else begin
                Tr:=R4(Tr);
            end;

        Res:=(2*dy*ha(dy,Tar,Tc)+dx*(hb(dx,Tar,Tc)+hc(dx,Tar,Tc)))
*(Tar-Tc);

        Res:=Res+(2*d*ha(d,Tar,Tp)+c*(hb(c,Tar,Tp)+hc(c,Tar,Tp)))
*(Tar-Tp);
        Res:=Res-2*(2*a*ha(a,Tr,Tar)
+b*(hb(b,Tr,Tar)+hc(b,Tr,Tar)))*(Tr-Tar);
        until Res<0;
        Tp:=Tp-10;
        repeat
            E2:Tp:=Tp+1;
            Tr:=(2*Req1+Req2+Req3)*(Tp-Tamb)
+2*(2*F2+F3)*(P4D(Tp,Tc));
            if Tp=Tar then goto E2
                else Tr:=(Tr-(2*d*ha(d,Tar,Tp)
+c*(hb(c,Tar,Tp)+hc(c,Tar,Tp)))*(Tar-Tp))/(2*(F5+2*F6));
            Tr:=SQR(SQR(Tp))+Tr;
            if Tr<=0 then begin
                goto E2;
            end
            else begin
                Tr:=R4(Tr);
            end;

        Res:=(2*dy*ha(dy,Tar,Tc)+dx*(hb(dx,Tar,Tc)+hc(dx,Tar,Tc)))
*(Tar-Tc);

```

```

Res:=Res+(2*d*ha(d,Tar,Tp)+c*(hb(c,Tar,Tp)+hc(c,Tar,Tp)))
*(Tar-Tp);
    Res:=Res-2*(2*a*ha(a,Tr,Tar)
+b*(hb(b,Tr,Tar)+hc(b,Tr,Tar)))*(Tr-Tar);
    until Res<0;
    Tp:=Tp-1;
    repeat
        E3:Tp:=Tp+0.1;
        Tr:=(2*Req1+Req2+Req3)*(Tp-Tamb)
+2*(2*F2+F3)*(P4D(Tp,Tc));
        if Tp=Tar then goto E3
            else Tr:=(Tr-(2*d*ha(d,Tar,Tp)
+c*(hb(c,Tar,Tp)+hc(c,Tar,Tp)))*(Tar-Tp))/(2*(F5+2*F6));
        Tr:=SQR(SQR(Tp))+Tr;
        if Tr<=0 then begin
            goto E3;
        end
        else begin
            Tr:=R4(Tr);
        end;

Res:=(2*dy*ha(dy,Tar,Tc)+dx*(hb(dx,Tar,Tc)+hc(dx,Tar,Tc)))
*(Tar-Tc);

Res:=Res+(2*d*ha(d,Tar,Tp)+c*(hb(c,Tar,Tp)+hc(c,Tar,Tp)))
*(Tar-Tp);
    Res:=Res-2*(2*a*ha(a,Tr,Tar)
+b*(hb(b,Tr,Tar)+hc(b,Tr,Tar)))*(Tr-Tar);
    until Res<0;
Tcf:=(F1+2*F4)*P4D(Tr,Tc)+(F3+2*F2)*P4D(Tp,Tc);
Tcf:=Tcf+(dy*ha(dy,Tar,Tc)+(dx/2)*(hb(dx,Tar,Tc)
+hc(dx,Tar,Tc)))*(Tar-Tc);
Tcf:=Tc+(Tcf/FF);
C1[cont1,1]:=t;
C1[cont1,2]:=Tc-273;
C2[cont2,1]:=t;
C2[cont2,2]:=Tar-273;
C3[cont1,1]:=t;
C3[cont1,2]:=Tamb-273;
if t=(I-1)*It then begin
    C2[cont2,2]:=Tmod[I-1]-273;
    cont2:=cont2+1;
    C2[cont2,1]:=t;
    C2[cont2,2]:=Tmod[I]-273;
end;

cont1:=cont1+1;
cont2:=cont2+1;
Tc:=Tcf;
t:=t+dt;
end;

ClearScreen;
DefineWindow(1,8,0,XMaxGlb,YMaxGlb);

```

```

DefineHeader(1,Graf);
DefineWorld(1,0,430,190,0);
SelectWorld(1);
SelectWindow(1);
SetBackground(0);
SetHeaderOn;
DrawBorder;
DrawAxis(5,-5,1,6,1,12,0,0,true);
DrawPolygon(C1,1,cont1-1,3,1,0);
SelectWorld(1);
SelectWindow(1);
DrawAxis(5,-5,1,6,1,12,0,0,true);
DrawPolygon(C2,1,cont2-2,10,0,0);
SelectWorld(1);
SelectWindow(1);
DrawAxis(5,-5,1,6,1,12,0,0,true);
DrawPolygon(C3,1,cont1-1,1,1,0);
Graf:='-- MODULO      '+Chr(27)+'3'+ ' '+Chr(27)+'3'+ ' FIO
'+Chr(27)+'1'+ ' '+Chr(27)+'1'+ ' AMBIENTE';
DrawText(290,342,1,Graf);
end;

```

```

BEGIN
  InitGraphic;
  GeraTela;
  repeat until KeyPressed;
  HardCopy(false,6);
  LeaveGraphic;
END.

```

7.2 SIMULAÇÕES

Utilizando os programas apresentados no item 7.1 foi possível registrar uma série de simulações que serviram como teste do modelo e controle de aferição do mesmo.

Primeiramente são apresentadas tabelas que devem ser melhor explicadas neste item. Note a partir delas que os valores de Res (resíduo do cálculo das temperaturas) e ResP (resíduo do cálculo das potências) são muito semelhantes a menos de estarem deslocados de uma linha. Os valores são realmente os mesmos pois as equações utilizadas no cálculo das temperaturas são combinações lineares das equações usadas no cálculo das potências envolvidas no processo.

As colunas estarem deslocadas de um Δt se deve ao fato das tabelas começarem do instante zero, onde são calculadas as temperaturas de equilíbrio que valerão durante o Δt seguinte. No final deste Δt são apresentadas as novas temperaturas de equilíbrio e a potência consumida no trecho anterior de estufa, calculadas a partir das temperaturas de equilíbrio no instante anterior. Desta forma, os resíduos calculados são apresentados defasados de uma linha.

Note ainda que quando as temperaturas de equilíbrio (T_R e T_P) mudam bruscamente ocorre uma transição entre módulos com temperaturas de regulação diferentes. Ou seja, as temperaturas de equilíbrio são calculadas para o instante seguinte tendo como base a nova temperatura de regulação.

Mais uma observação em relação às tabelas deve ser feita relativa à última linha. Os valores de T_R e T_P não tem sentido pois foram calculados como temperaturas de equilíbrio fora dos módulos, onde as equações não tem mais validade. A linha final da tabela mostra o último instante de tempo antes do fio deixar os módulos. Já foi dito que em cada Δt calculamos as temperaturas que serão válidas para o cálculo do transitório no instante seguinte. Desta forma, no instante final o programa calcula as temperaturas de equilíbrio fora da estufa, o que não tem validade. Os demais valores desta linha continuam válidos.

São apresentadas sete simulações em forma de tabela da seguinte forma:

t1) Cinco tabelas referidas a uma mesma bitola de fio, com velocidades de linha iguais e mantida uma temperatura de regulagem uniforme (considere um único módulo de dez metros de comprimento). Neste caso podemos comparar as perdas para o ambiente em diferentes temperaturas de regulagem para uma mesma temperatura de saída (obviamente alterando o tempo de permanência do fio dentro da estufa). Assim temos a eficiência dos módulos para cada faixa de trabalho. Quando a temperatura de regulagem é elevada, atingimos uma mesma temperatura para o fio em um intervalo de tempo menor, mas aumentamos as perdas para o meio. Aumentando a temperatura de regulagem da estufa e a velocidade da linha, aumentamos a capacidade de produção, mas devemos estimar qual é a faixa

mais eficiente do ponto de vista de consumo de energia (ver páginas 90 a 94);

t2) Simulação do caso real. Como já foi estabelecido anteriormente, uma medição de valores de temperatura foi realizada para aferir o modelo. Os dados médios coletados são aqueles listados na entrada de dados da simulação que se encontra na página 95. A partir desta simulação adotamos um valor para a condutividade do isolante utilizado em todas as demais simulações. Os valores medidos na saída da estufa foram:

$T_R = 400^{\circ}\text{C}$ (última resistência);

$T_P = 220^{\circ}\text{C}$ (no extremo ao centro da parede);

$T_C = 240^{\circ}\text{C}$;

$T_{PEXT} = 70^{\circ}\text{C}$ (valor médio em toda a estufa).

Verifique que a potência consumida deve ser menor que a máxima instalada;

t3) Simulação de um item incluído nas primeiras cinco simulações com um Δt diferente. A finalidade desta simulação é comparar duas tabelas para verificar que um intervalo de tempo diferente influi pouco na precisão do modelo (ver página 96).

Quanto aos gráficos simulamos o seguinte:

g1) Duas bitolas de dois materiais diferentes expostos a temperaturas variando de 200 a 400°C, com intervalos de 50°C. Geramos 20 gráficos que servem para acompanhar a evolução do perfil de temperaturas do fio (ver páginas 97 a 116). A simulação foi feita para um módulo de 10 metros de

comprimento exposto a uma temperatura uniforme (ou cinco módulos de 2 metros regulados para uma mesma temperatura). Foi adotada a velocidade de 3,33 m/min para a linha, pois juntamente com a dimensão total da estufa fornece um intervalo de tempo para a curva $T_c \times t$ igual a 180 segundos (o mesmo vale para uma estufa de 9 metros com velocidade de linha de 3 m/min). Nos interessa um intervalo de tempo grande pois a curva $T_c \times t$ é única e independe de V_L e L . As bitolas adotadas serão: 2x4 e 3x5 mm. As demais bitolas comerciais são: 3x4,5 - 3x6,5 - 1,5x6,5 - 2,7x7,2 mm (o software ao formar o cabeçalho dos gráficos arredonda os valores decimais, para distinguir nos exemplos 3x4,5 de 3x5 utilizamos o valor 3x4,49 que aparece nos cabeçalhos como 3x4);

g2) Simulação de todas as bitolas para uma mesma temperatura de regulação, para núcleos de alumínio. Permite comparar as curvas de aquecimento de bitolas diferentes e um mesmo material (ver páginas 117 a 122);

g3) Simulação do caso real. A sexta tabela apresentada (ver página 95) está representada neste gráfico (ver página 123);

g4) Em função dos dados apresentados para o processo de cura no item 1, vamos simular degraus de temperatura que forneçam as condições ideais de aquecimento. Verificamos assim quais são os melhores arranjos para o perfil de temperatura segundo as características da resina. Adotaremos como conhecido que a reação de cura comece a 130°C, que a

temperatura limite de cura (teste Koffler) seja 170°C e o gel-time aproxime-se de 30 segundos. Depois do intervalo de cura a temperatura deve subir a níveis próximos a 220°C para permitir a reação de pós-cura. O gráfico apresentado na página 124 não foi otimizado em termos de redução do comprimento da estufa;

g5) Exemplos diversos (ver páginas 125 a 127). A finalidade destas simulações é demonstrar o uso potencial do modelo no pré-projeto de estufas semelhantes às estudadas. Primeiro, de acordo com o processo, adequamos o perfil de temperaturas às características da resina. A partir deste ponto determinamos comprimentos e número de módulos do novo projeto.

Maiores informações podem ser retiradas da observação dos gráficos e tabelas.

POWDER COATING

Numero de modulos: 1
 Temperatura de regulagem do modulo 1 (C): 200
 Material do nucleo - Aluminio (A) ou Cobre (C): A
 Dimensao horizontal do fio (mm): 4
 Dimensao vertical do fio (mm): 2
 Temperatura do ambiente (C): 25
 Comprimento de cada modulo (m): 10
 Velocidade da linha (m/min): 3.33
 Maximo intervalo de tempo permitido (s): 59.436
 Intervalo a ser adotado (s): 5.000

t(s)	Tc(C)	Tr(C)	Tp(C)	Res(W/m)	Pot(W/m)	Pc(W/m)	Pamb(W/m)	ResP(W/m)
0.0	25.0	259.2	178.8	-0.11	0.0	0.0	0.0	0.00
5.0	41.8	257.7	178.5	-0.46	244.0	65.1	178.7	0.11
10.0	57.0	256.3	178.2	-0.18	237.9	59.0	178.4	0.46
15.0	70.8	255.1	178.0	-0.53	231.6	53.4	178.0	0.18
20.0	83.2	253.9	177.8	-0.42	226.7	48.4	177.8	0.53
25.0	94.5	253.1	177.7	-1.09	221.7	43.7	177.6	0.42
30.0	104.7	251.9	177.5	-0.24	218.0	39.5	177.4	1.09
35.0	113.8	251.1	177.4	-0.29	213.0	35.6	177.2	0.24
40.0	122.1	250.3	177.3	-0.10	209.4	32.0	177.1	0.29
45.0	129.5	249.8	177.3	-0.90	205.9	28.9	177.0	0.10
50.0	136.2	249.0	177.2	-0.34	203.9	26.0	177.0	0.90
55.0	142.2	248.6	177.2	-0.84	200.6	23.4	176.9	0.34
60.0	147.6	247.9	177.1	-0.03	198.7	21.0	176.9	0.84
65.0	152.5	247.6	177.1	-0.33	195.6	18.9	176.7	0.03
70.0	156.9	247.2	177.1	-0.55	194.0	17.0	176.7	0.33
75.0	160.8	246.9	177.1	-0.71	192.5	15.2	176.7	0.55
80.0	164.3	246.7	177.1	-0.83	191.2	13.7	176.7	0.71
85.0	167.5	246.4	177.1	-0.90	189.9	12.3	176.7	0.83
90.0	170.4	246.2	177.1	-0.95	188.7	11.1	176.7	0.90
95.0	172.9	246.0	177.1	-0.97	187.6	9.9	176.7	0.95
100.0	175.2	245.8	177.1	-0.97	186.6	8.9	176.7	0.97
105.0	177.3	245.6	177.1	-0.96	185.7	8.0	176.7	0.97
110.0	179.2	245.4	177.1	-0.94	184.9	7.2	176.7	0.96
115.0	180.8	245.3	177.1	-0.91	184.2	6.5	176.7	0.94
120.0	182.3	245.1	177.1	-0.87	183.5	5.8	176.7	0.91
125.0	183.7	245.0	177.1	-0.84	182.9	5.3	176.7	0.87
130.0	184.9	244.9	177.1	-0.80	182.3	4.7	176.7	0.84
135.0	186.0	244.8	177.1	-0.76	181.8	4.3	176.7	0.80
140.0	187.0	244.7	177.1	-0.72	181.3	3.8	176.7	0.76
145.0	187.9	244.6	177.1	-0.68	180.9	3.5	176.7	0.72
150.0	188.7	244.5	177.1	-0.64	180.5	3.1	176.7	0.68
155.0	189.4	244.5	177.1	-0.60	180.2	2.8	176.7	0.64
160.0	190.1	244.4	177.1	-0.56	179.9	2.5	176.7	0.60
165.0	190.7	244.4	177.1	-0.53	179.6	2.3	176.7	0.56
170.0	191.2	244.3	177.1	-0.49	179.3	2.1	176.7	0.53
175.0	191.7	244.3	177.1	-0.46	179.1	1.9	176.7	0.49
180.0	192.1	244.2	177.1	-0.43	178.9	1.7	176.7	0.46

POWDER COATING

Numero de modulos: 1
 Temperatura de regulagem do modulo 1 (C): 250
 Material do nucleo - Aluminio (A) ou Cobre (C): A
 Dimensao horizontal do fio (mm): 4
 Dimensao vertical do fio (mm): 2
 Temperatura do ambiente (C): 25
 Comprimento de cada modulo (m): 10
 Velocidade da linha (m/min): 3.33
 Maximo intervalo de tempo permitido (s): 47.478
 Intervalo a ser adotado (s): 5.000

t(s)	Tc(C)	Tr(C)	Tp(C)	Res(W/m)	Pot(W/m)	Pc(W/m)	Pamb(W/m)	ResP(W/m)
0.0	25.0	317.1	228.1	-0.68	0.0	0.0	0.0	0.00
5.0	49.4	315.0	227.5	-0.81	331.3	94.7	236.0	0.68
10.0	71.3	313.1	227.0	-0.89	321.3	85.2	235.3	0.81
15.0	91.1	311.2	226.5	-0.01	312.2	76.5	234.7	0.89
20.0	108.7	309.7	226.2	-0.41	302.7	68.6	234.1	0.01
25.0	124.5	308.3	225.9	-0.12	295.5	61.3	233.8	0.41
30.0	138.6	307.1	225.7	-0.31	288.2	54.7	233.4	0.12
35.0	151.2	305.9	225.5	-0.01	282.2	48.7	233.2	0.31
40.0	162.3	305.0	225.4	-0.37	276.2	43.2	233.0	0.01
45.0	172.2	304.1	225.3	-0.41	271.6	38.3	232.9	0.37
50.0	180.9	303.3	225.2	-0.19	267.1	33.9	232.8	0.41
55.0	188.6	302.7	225.2	-0.82	262.8	30.0	232.6	0.19
60.0	195.5	302.0	225.1	-0.21	259.9	26.5	232.6	0.82
65.0	201.5	301.5	225.1	-0.54	256.0	23.3	232.5	0.21
70.0	206.8	301.1	225.1	-0.77	253.6	20.5	232.5	0.54
75.0	211.4	300.7	225.1	-0.92	251.4	18.1	232.5	0.77
80.0	215.5	300.4	225.1	-1.00	249.4	15.9	232.5	0.92
85.0	219.1	300.1	225.1	-1.05	247.5	14.0	232.5	1.00
90.0	222.3	299.8	225.1	-1.06	245.9	12.3	232.5	1.05
95.0	225.1	299.6	225.1	-1.04	244.4	10.8	232.5	1.06
100.0	227.5	299.4	225.1	-1.01	243.1	9.5	232.5	1.04
105.0	229.7	299.2	225.1	-0.97	241.9	8.4	232.5	1.01
110.0	231.6	299.0	225.1	-0.92	240.8	7.4	232.5	0.97
115.0	233.3	298.9	225.1	-0.86	239.9	6.5	232.5	0.92
120.0	234.7	298.7	225.1	-0.80	239.1	5.7	232.5	0.86
125.0	236.0	298.6	225.1	-0.75	238.3	5.0	232.5	0.80
130.0	237.2	298.5	225.1	-0.69	237.7	4.4	232.5	0.75
135.0	238.2	298.4	225.1	-0.64	237.1	3.9	232.5	0.69
140.0	239.0	298.3	225.1	-0.59	236.6	3.4	232.5	0.64
145.0	239.8	298.2	225.1	-0.54	236.1	3.0	232.5	0.59
150.0	240.5	298.2	225.1	-0.50	235.7	2.7	232.5	0.54
155.0	241.1	298.1	225.1	-0.46	235.4	2.3	232.5	0.50
160.0	241.6	298.1	225.1	-0.42	235.0	2.1	232.5	0.46
165.0	242.1	298.0	225.1	-0.39	234.8	1.8	232.5	0.42
170.0	242.5	298.0	225.1	-0.36	234.5	1.6	232.5	0.39
175.0	242.9	297.9	225.1	-0.33	234.3	1.4	232.5	0.36
180.0	243.2	297.9	225.1	-0.30	234.1	1.3	232.5	0.33

POWDER COATING

Numero de modulos: 1
 Temperatura de regulagem do modulo 1 (C): 300
 Material do nucleo - Aluminio (A) ou Cobre (C): A
 Dimensao horizontal do fio (mm): 4
 Dimensao vertical do fio (mm): 2
 Temperatura do ambiente (C): 25
 Comprimento de cada modulo (m): 10
 Velocidade da linha (m/min): 3.33
 Maximo intervalo de tempo permitido (s): 38.215
 Intervalo a ser adotado (s): 5.000

t(s)	Tc(C)	Tr(C)	Tp(C)	Res(W/m)	Pot(W/m)	Pc(W/m)	Pamb(W/m)	ResP(W/m)
0.0	25.0	372.6	278.7	-0.27	0.0	0.0	0.0	0.00
5.0	58.5	369.8	277.7	-0.39	425.1	130.0	294.8	0.27
10.0	88.4	367.4	276.9	-0.65	410.3	116.2	293.6	0.39
15.0	115.1	365.1	276.2	-0.34	396.9	103.6	292.7	0.65
20.0	138.8	363.1	275.7	-0.63	384.1	91.9	291.9	0.34
25.0	159.7	361.4	275.3	-0.79	373.1	81.2	291.3	0.63
30.0	178.1	359.6	274.9	-0.04	363.1	71.4	290.9	0.79
35.0	194.3	358.3	274.7	-0.47	352.9	62.5	290.4	0.04
40.0	208.3	357.0	274.5	-0.30	345.2	54.5	290.2	0.47
45.0	220.5	356.0	274.4	-0.62	337.6	47.4	289.9	0.30
50.0	231.1	355.1	274.3	-0.58	331.5	41.1	289.8	0.62
55.0	240.2	354.2	274.2	-0.25	325.7	35.4	289.7	0.58
60.0	248.1	353.6	274.2	-0.68	320.3	30.5	289.6	0.25
65.0	254.9	353.1	274.2	-0.95	316.5	26.3	289.6	0.68
70.0	260.7	352.4	274.1	-0.14	313.1	22.5	289.6	0.95
75.0	265.6	351.9	274.1	-0.21	308.9	19.3	289.5	0.14
80.0	269.9	351.6	274.1	-0.22	306.2	16.5	289.5	0.21
85.0	273.5	351.2	274.1	-0.20	303.8	14.1	289.5	0.22
90.0	276.6	351.0	274.1	-0.15	301.7	12.1	289.5	0.20
95.0	279.3	350.7	274.1	-0.08	299.9	10.3	289.5	0.15
100.0	281.6	350.5	274.1	-0.01	298.4	8.8	289.5	0.08
105.0	283.5	350.6	274.2	-0.90	297.0	7.5	289.5	0.01
110.0	285.2	350.4	274.2	-0.82	297.0	6.5	289.6	0.90
115.0	286.6	350.3	274.2	-0.75	296.0	5.6	289.6	0.82
120.0	287.8	350.2	274.2	-0.68	295.1	4.7	289.6	0.75
125.0	288.9	350.1	274.2	-0.61	294.3	4.1	289.6	0.68
130.0	289.8	350.0	274.2	-0.56	293.7	3.5	289.6	0.61
135.0	290.5	349.9	274.2	-0.50	293.1	3.0	289.6	0.56
140.0	291.2	349.8	274.2	-0.45	292.6	2.5	289.6	0.50
145.0	291.8	349.8	274.2	-0.41	292.2	2.2	289.6	0.45
150.0	292.2	349.7	274.2	-0.37	291.8	1.9	289.6	0.41
155.0	292.7	349.7	274.2	-0.34	291.5	1.6	289.6	0.37
160.0	293.0	349.6	274.2	-0.31	291.3	1.4	289.6	0.34
165.0	293.3	349.6	274.2	-0.28	291.1	1.2	289.6	0.31
170.0	293.6	349.6	274.2	-0.26	290.9	1.0	289.6	0.28
175.0	293.8	349.6	274.2	-0.24	290.7	0.9	289.6	0.26
180.0	294.0	349.5	274.2	-0.23	290.6	0.7	289.6	0.24

POWDER COATING

Numero de modulos: 1
 Temperatura de regulagem do modulo 1 (C): 350
 Material do nucleo - Aluminio (A) ou Cobre (C): A
 Dimensao horizontal do fio (mm): 4
 Dimensao vertical do fio (mm): 2
 Temperatura do ambiente (C): 25
 Comprimento de cada modulo (m): 10
 Velocidade da linha (m/min): 3.33
 Maximo intervalo de tempo permitido (s): 31.030
 Intervalo a ser adotado (s): 5.000

t(s)	Tc(C)	Tr(C)	Tp(C)	Res(W/m)	Pot(W/m)	Pc(W/m)	Pamb(W/m)	ResP(W/m)
0.0	25.0	426.6	330.4	-0.25	0.0	0.0	0.0	0.00
5.0	69.4	423.2	328.9	-0.74	527.3	172.2	354.9	0.25
10.0	108.8	419.9	327.6	-0.31	506.9	153.0	353.1	0.74
15.0	143.6	417.1	326.6	-0.19	487.0	135.1	351.6	0.31
20.0	174.1	414.7	325.9	-0.75	469.1	118.5	350.5	0.19
25.0	200.7	412.4	325.3	-0.55	453.6	103.2	349.6	0.75
30.0	223.7	410.5	324.9	-0.80	438.7	89.2	349.0	0.55
35.0	243.4	408.8	324.6	-0.87	425.8	76.5	348.5	0.80
40.0	260.2	407.1	324.3	-0.11	414.1	65.1	348.1	0.87
45.0	274.4	406.0	324.2	-0.53	403.0	55.1	347.8	0.11
50.0	286.3	404.9	324.1	-0.48	394.6	46.4	347.7	0.53
55.0	296.3	403.9	324.0	-0.10	386.8	38.8	347.6	0.48
60.0	304.7	403.2	324.0	-0.38	379.9	32.3	347.4	0.10
65.0	311.6	402.6	324.0	-0.51	374.7	26.9	347.4	0.38
70.0	317.3	402.1	324.0	-0.54	370.3	22.3	347.4	0.51
75.0	322.1	401.7	324.0	-0.49	366.5	18.5	347.4	0.54
80.0	326.1	401.3	324.0	-0.42	363.2	15.3	347.4	0.49
85.0	329.3	401.0	324.0	-0.32	360.5	12.6	347.4	0.42
90.0	332.0	400.8	324.0	-0.21	358.2	10.4	347.4	0.32
95.0	334.2	400.5	324.0	-0.11	356.2	8.6	347.4	0.21
100.0	336.0	400.4	324.0	-0.01	354.6	7.1	347.4	0.11
105.0	337.5	400.4	324.1	-0.82	353.3	5.8	347.4	0.01
110.0	338.8	400.3	324.1	-0.73	353.3	4.9	347.6	0.82
115.0	339.8	400.2	324.1	-0.66	352.3	4.0	347.6	0.73
120.0	340.7	400.1	324.1	-0.60	351.5	3.3	347.6	0.66
125.0	341.4	400.0	324.1	-0.54	350.9	2.7	347.6	0.60
130.0	342.0	400.0	324.1	-0.49	350.4	2.3	347.6	0.54
135.0	342.5	399.9	324.1	-0.45	349.9	1.9	347.6	0.49
140.0	342.9	399.9	324.1	-0.42	349.6	1.5	347.6	0.45
145.0	343.2	399.9	324.1	-0.39	349.2	1.3	347.6	0.42
150.0	343.4	399.8	324.1	-0.36	349.0	1.1	347.6	0.39
155.0	343.7	399.8	324.1	-0.34	348.8	0.9	347.6	0.36
160.0	343.9	399.8	324.1	-0.32	348.6	0.7	347.6	0.34
165.0	344.0	399.8	324.1	-0.31	348.5	0.6	347.6	0.32
170.0	344.1	399.8	324.1	-0.30	348.4	0.5	347.6	0.31
175.0	344.2	399.8	324.1	-0.29	348.3	0.4	347.6	0.30
180.0	344.3	399.7	324.1	-0.28	348.2	0.3	347.6	0.29

POWDER COATING

Numero de modulos: 1
 Temperatura de regulagem do modulo 1 (C): 400
 Material do nucleo - Aluminio (A) ou Cobre (C): A
 Dimensao horizontal do fio (mm): 4
 Dimensao vertical do fio (mm): 2
 Temperatura do ambiente (C): 25
 Comprimento de cada modulo (m): 10
 Velocidade da linha (m/min): 3.33
 Maximo intervalo de tempo permitido (s): 25.427
 Intervalo a ser adotado (s): 5.000

t(s)	Tc(C)	Tr(C)	Tp(C)	Res(W/m)	Pot(W/m)	Pc(W/m)	Pamb(W/m)	ResP(W/m)
0.0	25.0	479.7	382.9	-0.19	0.0	0.0	0.0	0.00
5.0	82.3	475.2	380.6	-0.00	638.5	222.4	415.9	0.19
10.0	132.9	471.4	378.9	-0.73	609.4	196.1	413.2	0.00
15.0	177.1	467.8	377.5	-0.52	583.5	171.6	411.2	0.73
20.0	215.3	464.7	376.5	-0.73	558.5	148.4	409.6	0.52
25.0	248.0	461.8	375.7	-0.24	536.0	126.9	408.4	0.73
30.0	275.6	459.5	375.2	-0.37	514.8	107.0	407.5	0.24
35.0	298.6	457.6	374.9	-0.75	496.6	89.3	406.9	0.37
40.0	317.6	455.7	374.6	-0.07	481.0	73.6	406.6	0.75
45.0	333.0	454.4	374.5	-0.34	466.4	60.0	406.2	0.07
50.0	345.6	453.2	374.4	-0.10	455.1	48.6	406.1	0.34
55.0	355.6	452.4	374.4	-0.37	445.2	39.1	406.0	0.10
60.0	363.7	451.7	374.4	-0.44	437.6	31.3	406.0	0.37
65.0	370.1	451.1	374.4	-0.39	431.3	24.9	406.0	0.44
70.0	375.2	450.6	374.4	-0.28	426.2	19.8	406.0	0.39
75.0	379.2	450.2	374.4	-0.15	421.9	15.6	406.0	0.28
80.0	382.4	449.9	374.4	-0.01	418.5	12.4	406.0	0.15
85.0	384.9	449.8	374.5	-0.71	415.8	9.8	406.0	0.01
90.0	386.9	449.6	374.5	-0.59	414.6	7.8	406.1	0.71
95.0	388.5	449.4	374.5	-0.48	412.8	6.1	406.1	0.59
100.0	389.8	449.3	374.5	-0.39	411.4	4.8	406.1	0.48
105.0	390.7	449.2	374.5	-0.31	410.3	3.8	406.1	0.39
110.0	391.5	449.1	374.5	-0.24	409.4	3.0	406.1	0.31
115.0	392.1	449.1	374.5	-0.19	408.7	2.4	406.1	0.24
120.0	392.6	449.0	374.5	-0.14	408.2	1.9	406.1	0.19
125.0	393.0	449.0	374.5	-0.11	407.7	1.5	406.1	0.14
130.0	393.3	448.9	374.5	-0.08	407.4	1.2	406.1	0.11
135.0	393.5	448.9	374.5	-0.06	407.1	0.9	406.1	0.08
140.0	393.7	448.9	374.5	-0.04	406.9	0.7	406.1	0.06
145.0	393.9	448.9	374.5	-0.03	406.7	0.6	406.1	0.04
150.0	394.0	448.9	374.5	-0.01	406.6	0.5	406.1	0.03
155.0	394.1	448.9	374.5	-0.00	406.5	0.4	406.1	0.01
160.0	394.2	449.1	374.6	-0.84	406.4	0.3	406.1	0.00
165.0	394.2	449.0	374.6	-0.83	407.4	0.3	406.2	0.84
170.0	394.3	449.0	374.6	-0.83	407.3	0.2	406.2	0.83
175.0	394.3	449.0	374.6	-0.82	407.3	0.2	406.2	0.83
180.0	394.4	449.0	374.6	-0.82	407.2	0.2	406.2	0.82

POWDER COATING

Numero de modulos: 5

Temperatura de regulagem do modulo 1 (C): 243

Temperatura de regulagem do modulo 2 (C): 302

Temperatura de regulagem do modulo 3 (C): 307

Temperatura de regulagem do modulo 4 (C): 306

Temperatura de regulagem do modulo 5 (C): 318

Material do nucleo - Aluminio (A) ou Cobre (C): A

Dimensao horizontal do fio (mm): 5

Dimensao vertical do fio (mm): 3

Temperatura do ambiente (C): 28

Comprimento de cada modulo (m): 2

Velocidade da linha (m/min): 9.00

Maximo intervalo de tempo permitido (s): 51.657

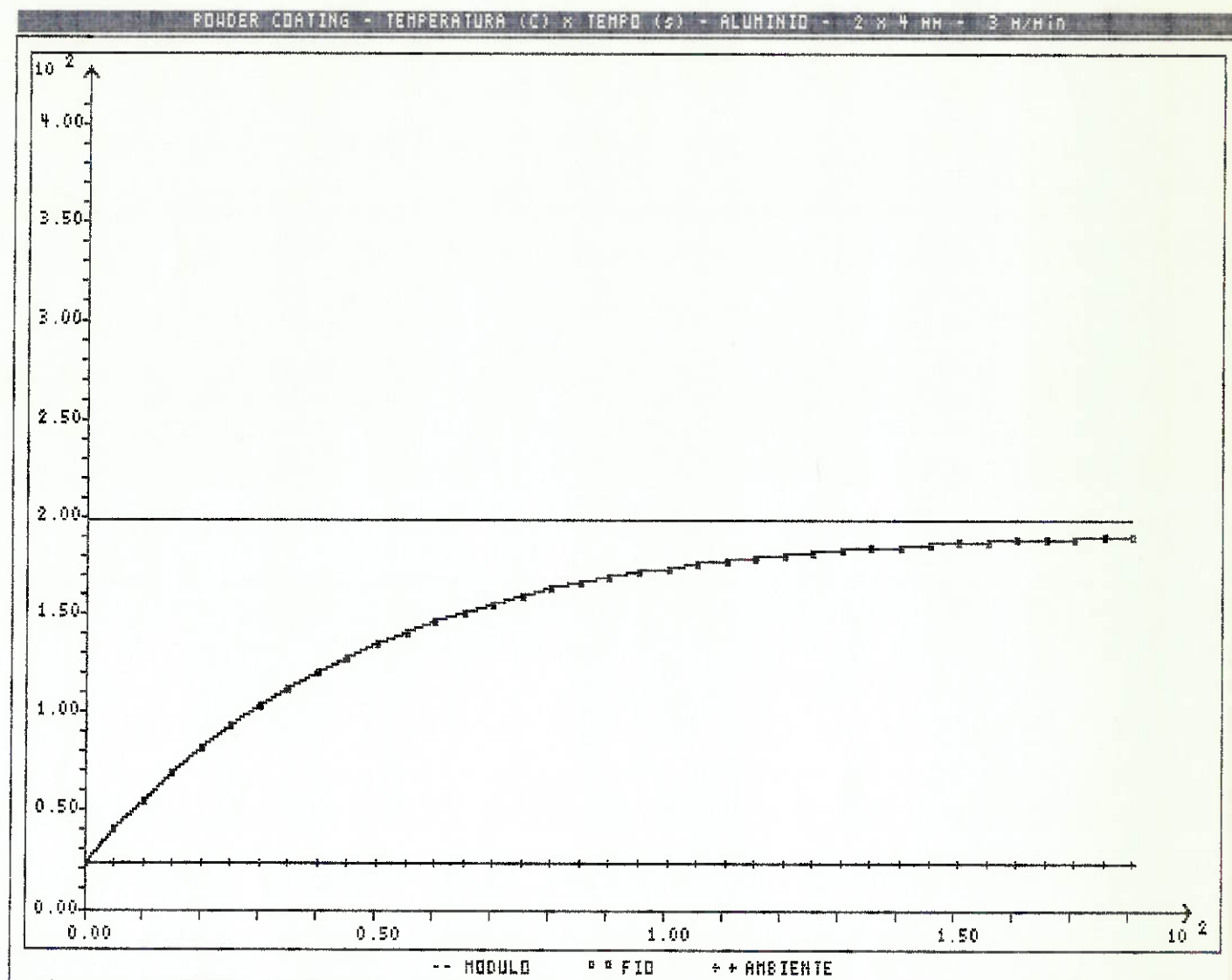
Intervalo a ser adotado (s): 2.000

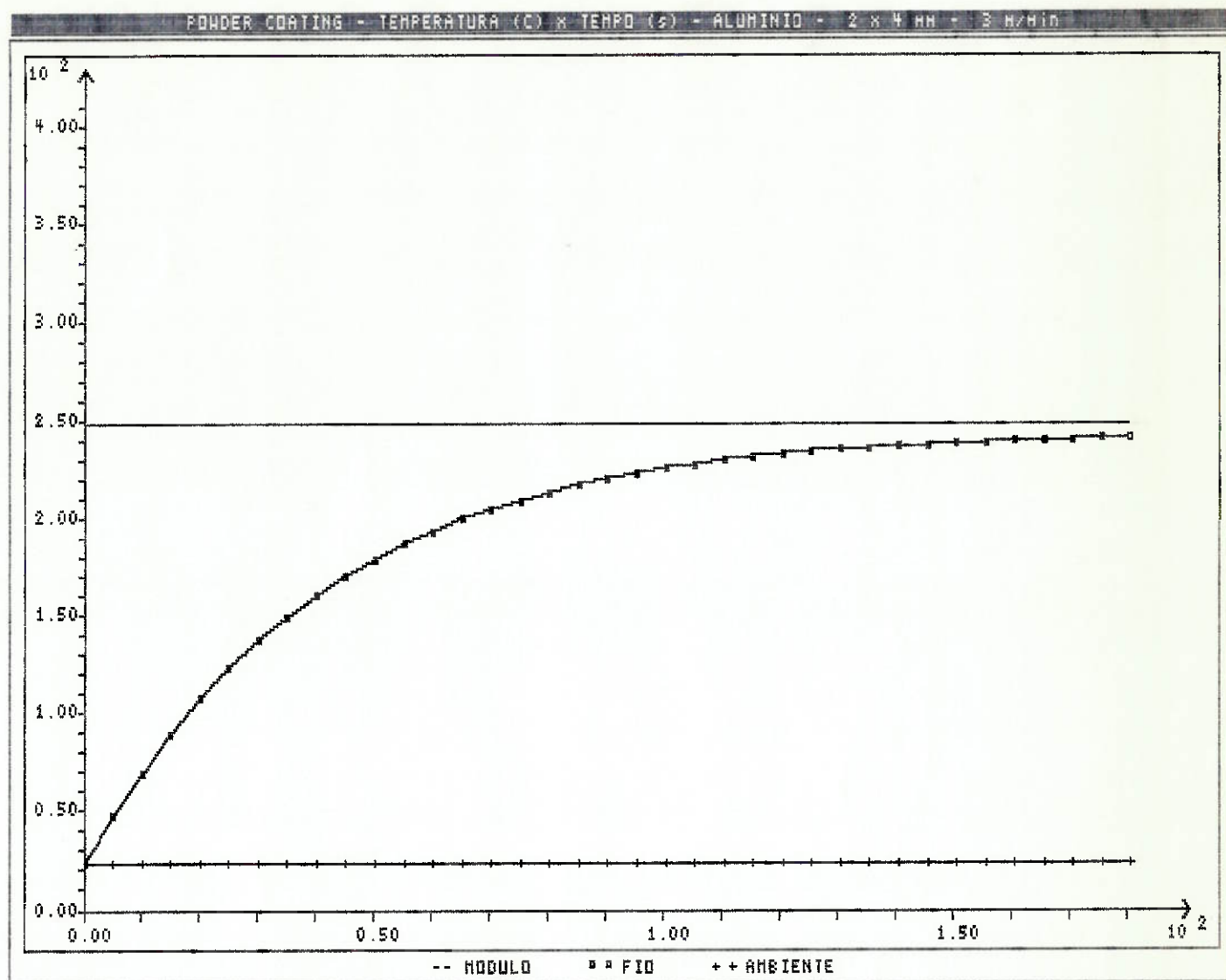
t(s)	Tc(C)	Tr(C)	Tp(C)	Res(W/m)	Pot(W/m)	Pc(W/m)	Pamb(W/m)	ResP(W/m)
0.0	28.0	312.6	222.0	-0.29	0.0	0.0	0.0	0.00
2.0	34.2	311.9	221.8	-0.20	338.3	113.2	224.7	0.29
4.0	40.3	311.2	221.6	-0.02	334.9	110.2	224.5	0.20
6.0	46.2	310.7	221.5	-0.80	331.5	107.3	224.3	0.02
8.0	51.9	310.0	221.3	-0.43	329.4	104.4	224.1	0.80
10.0	57.5	309.6	221.2	-1.04	325.9	101.6	223.9	0.43
12.0	62.9	308.8	221.0	-0.50	323.7	98.9	223.8	1.04
14.0	68.2	375.3	280.5	-0.03	320.2	96.1	223.6	0.50
16.0	76.2	374.7	280.3	-0.75	437.7	145.2	292.5	0.03
18.0	84.0	373.8	280.0	-0.38	434.0	141.0	292.3	0.75
20.0	91.5	373.1	279.8	-0.82	429.0	136.7	291.9	0.38
22.0	98.8	372.2	279.5	-0.19	425.2	132.6	291.7	0.82
24.0	105.8	371.5	279.3	-0.37	420.1	128.6	291.3	0.19
26.0	112.7	370.8	279.1	-0.43	416.1	124.6	291.1	0.37
28.0	119.3	375.7	284.0	-0.36	412.1	120.8	290.9	0.43
30.0	126.0	375.0	283.8	-0.31	418.7	121.8	296.5	0.36
32.0	132.5	374.3	283.6	-0.15	414.5	117.9	296.3	0.31
34.0	138.8	373.8	283.5	-0.82	410.3	114.1	296.1	0.15
36.0	144.8	373.0	283.3	-0.44	407.2	110.4	296.0	0.82
38.0	150.7	372.5	283.2	-0.92	403.0	106.8	295.7	0.44
40.0	156.4	370.7	282.0	-0.49	399.8	103.3	295.6	0.92
42.0	161.8	370.2	281.9	-0.76	393.6	98.9	294.2	0.49
44.0	167.1	369.7	281.8	-0.95	390.5	95.6	294.1	0.76
46.0	172.2	368.9	281.6	-0.11	387.3	92.4	294.0	0.95
48.0	177.1	368.4	281.5	-0.14	383.0	89.1	293.8	0.11
50.0	181.8	367.9	281.4	-0.10	379.9	86.1	293.7	0.14
52.0	186.4	367.6	281.4	-0.95	376.7	83.1	293.5	0.10
54.0	190.8	380.4	293.4	-0.37	374.7	80.2	293.5	0.95
56.0	195.6	379.9	293.3	-0.34	396.3	88.5	307.4	0.37
58.0	200.3	379.3	293.2	-0.25	393.0	85.3	307.3	0.34
60.0	204.8	378.8	293.1	-0.09	389.7	82.2	307.2	0.25
62.0	209.2	378.5	293.1	-0.80	386.3	79.2	307.1	0.09
64.0	213.4	378.0	293.0	-0.52	384.2	76.3	307.1	0.80
66.0	217.4	377.4	292.9	-0.19	380.9	73.4	307.0	0.52

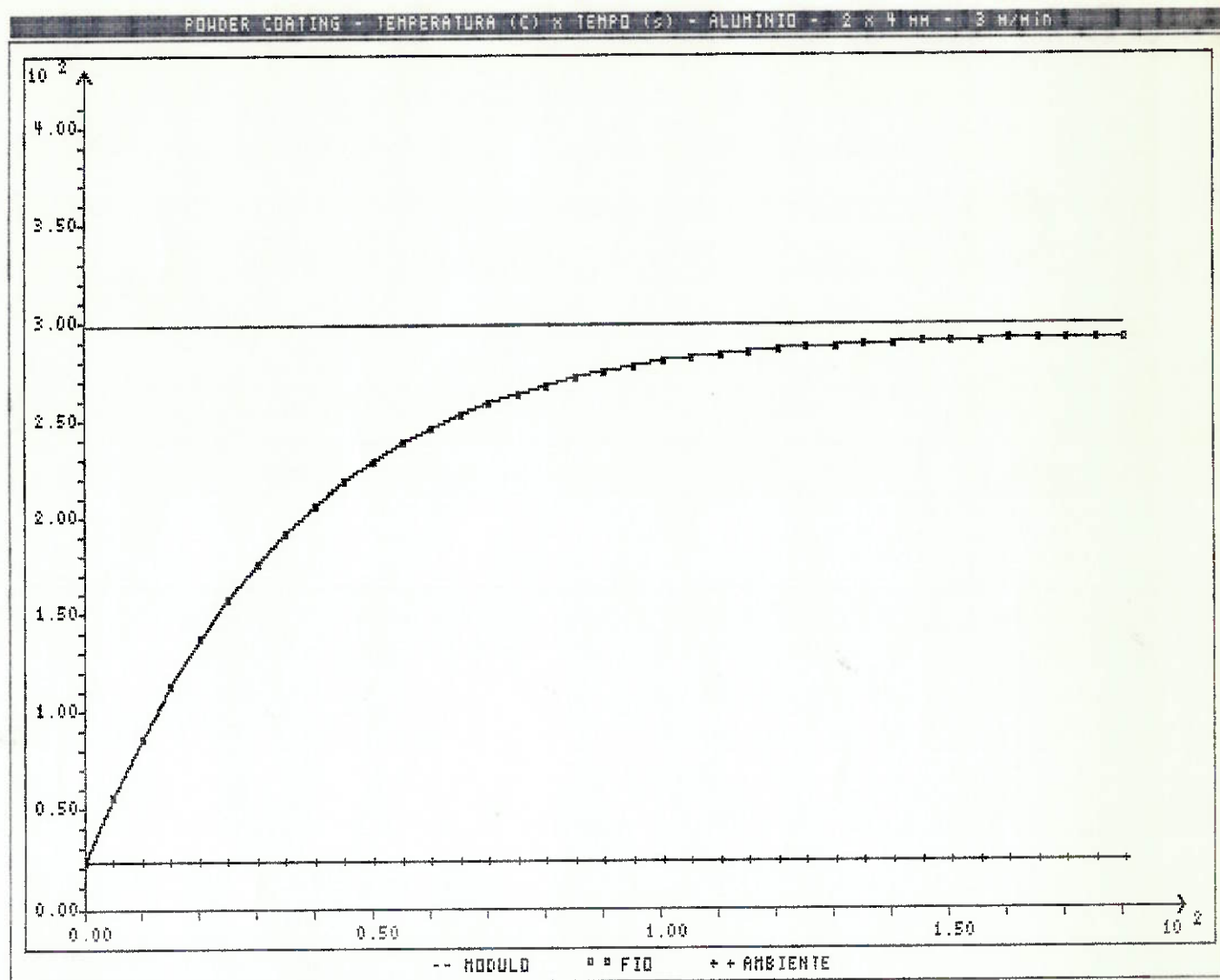
POWDER COATING

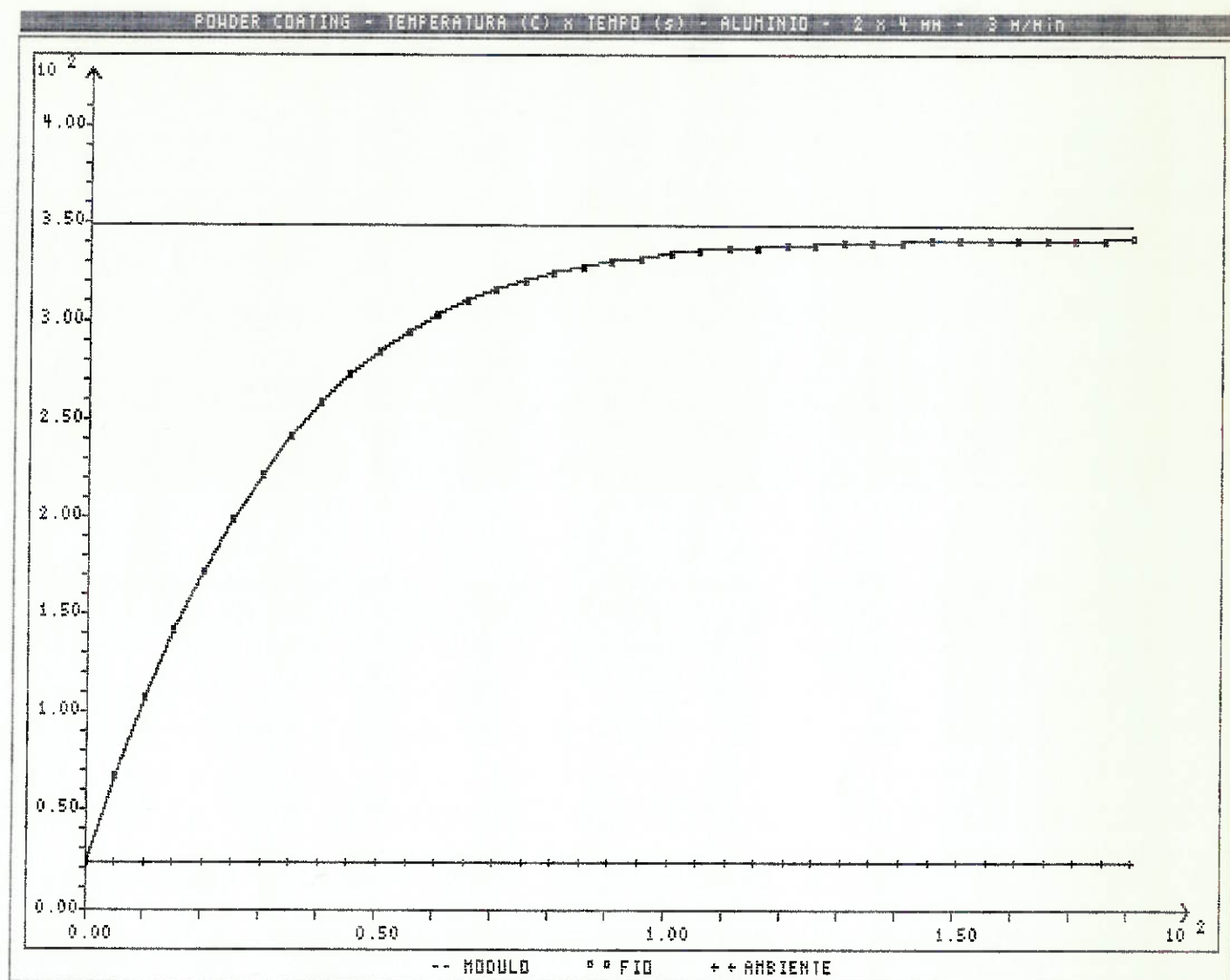
Numero de modulos: 1
 Temperatura de regulagem do modulo 1 (C): 300
 Material do nucleo - Aluminio (A) ou Cobre (C): A
 Dimensao horizontal do fio (mm): 4
 Dimensao vertical do fio (mm): 2
 Temperatura do ambiente (C): 25
 Comprimento de cada modulo (m): 10
 Velocidade da linha (m/min): 3.33
 Maximo intervalo de tempo permitido (s): 38.215
 Intervalo a ser adotado (s): 10.000

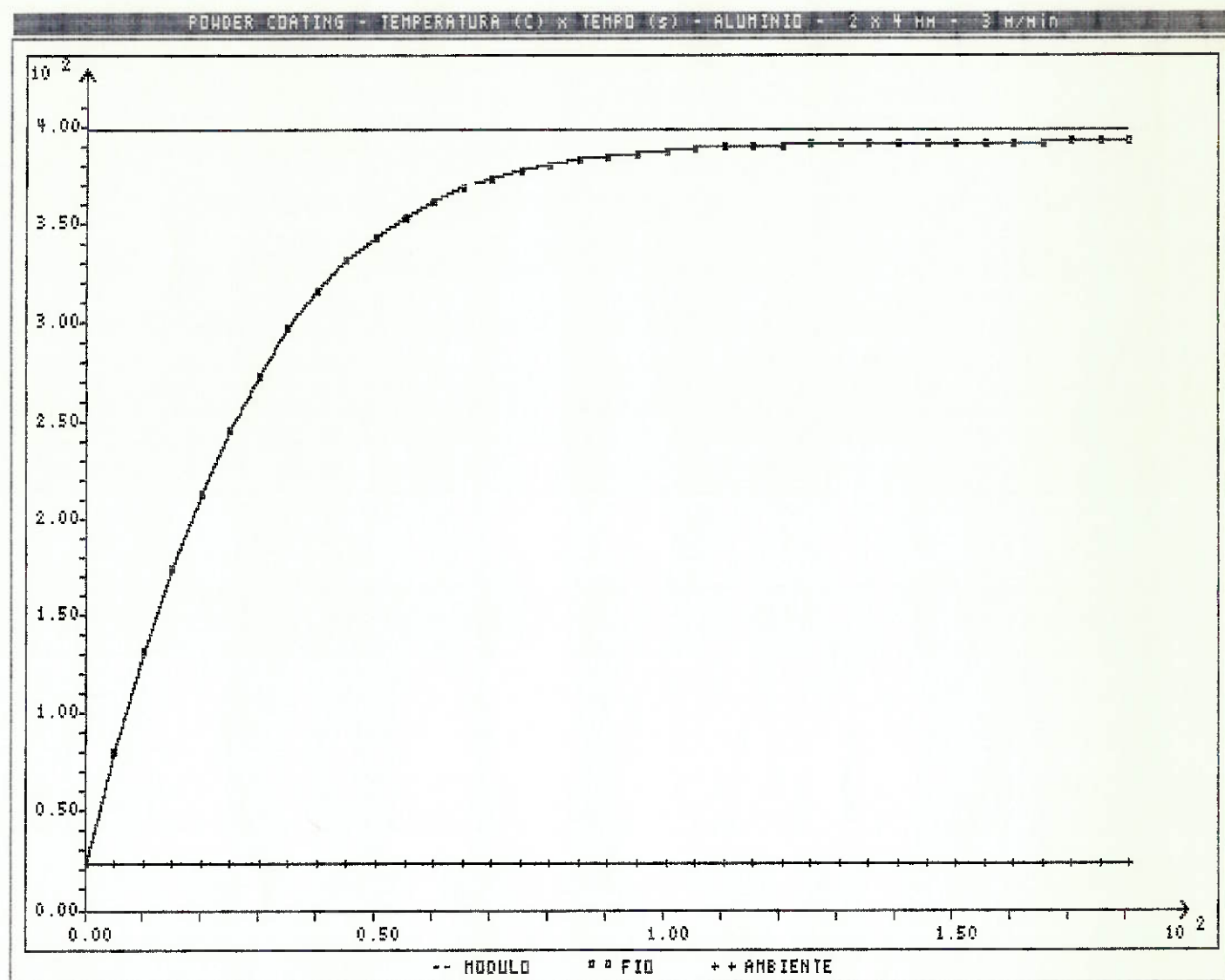
t(s)	Tc(C)	Tr(C)	Tp(C)	Res(W/m)	Pot(W/m)	Pc(W/m)	Pamb(W/m)	ResP(W/m)
0.0	25.0	372.6	278.7	-0.27	0.0	0.0	0.0	0.00
10.0	92.0	367.1	276.8	-0.58	425.1	130.0	294.8	0.27
20.0	144.6	362.7	275.6	-0.82	395.2	102.1	292.6	0.58
30.0	185.1	359.0	274.8	-0.13	370.6	78.5	291.2	0.82
40.0	215.5	356.4	274.4	-0.12	349.5	59.1	290.3	0.13
50.0	238.0	354.4	274.2	-0.11	333.6	43.6	289.8	0.12
60.0	254.4	353.1	274.2	-0.94	321.4	31.7	289.6	0.11
70.0	266.1	351.9	274.1	-0.21	313.3	22.8	289.6	0.94
80.0	274.5	351.2	274.1	-0.18	305.9	16.2	289.5	0.21
90.0	280.4	350.6	274.1	-0.04	301.2	11.5	289.5	0.18
100.0	284.6	350.5	274.2	-0.85	297.7	8.2	289.5	0.04
110.0	287.7	350.2	274.2	-0.69	296.3	5.9	289.6	0.85
120.0	289.8	350.0	274.2	-0.55	294.4	4.2	289.6	0.69
130.0	291.3	349.8	274.2	-0.44	293.1	3.0	289.6	0.55
140.0	292.4	349.7	274.2	-0.36	292.1	2.1	289.6	0.44
150.0	293.2	349.6	274.2	-0.29	291.4	1.5	289.6	0.36
160.0	293.7	349.6	274.2	-0.25	290.9	1.1	289.6	0.29
170.0	294.1	349.5	274.2	-0.21	290.6	0.8	289.6	0.25
180.0	294.4	349.5	274.2	-0.19	290.3	0.5	289.6	0.21

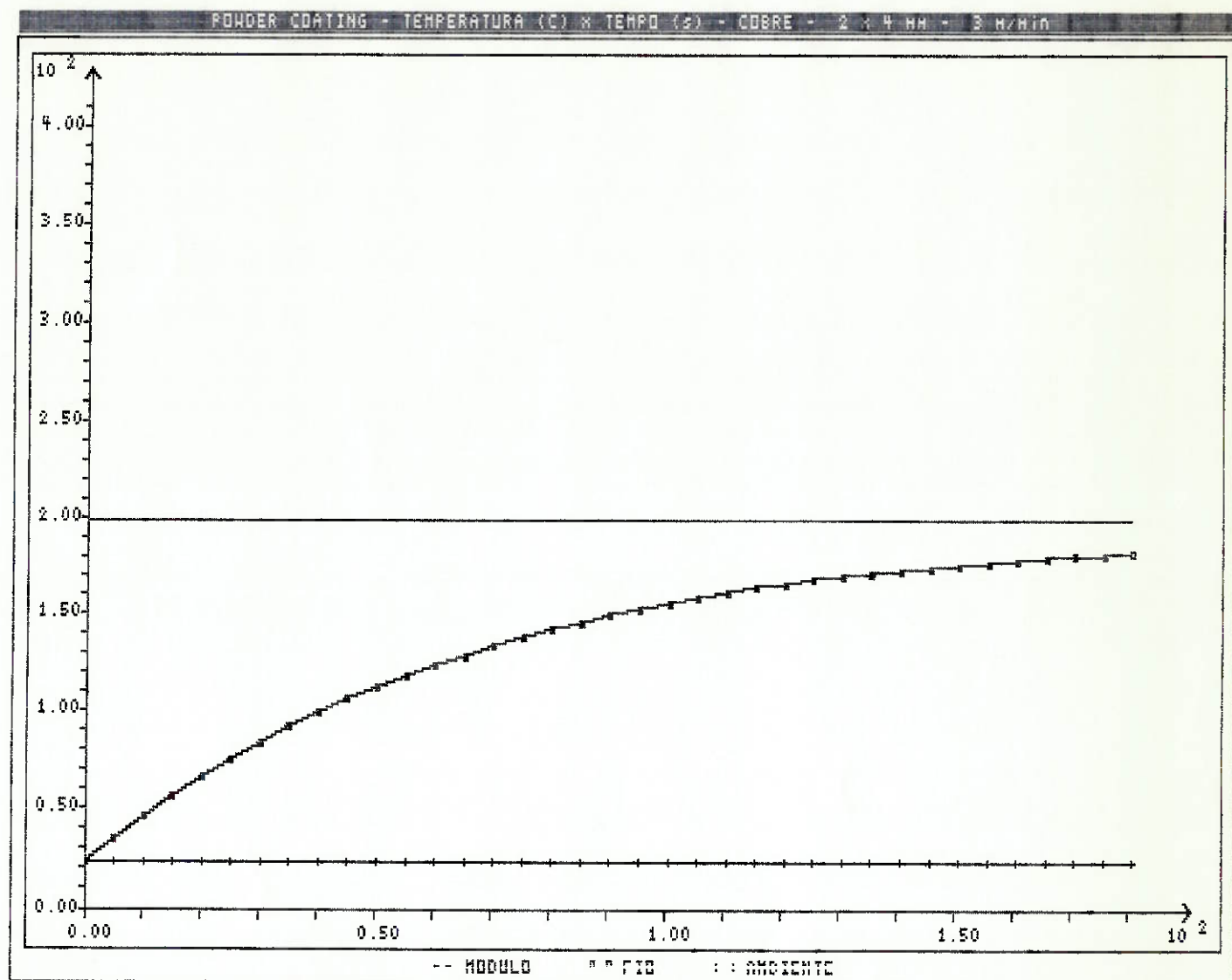


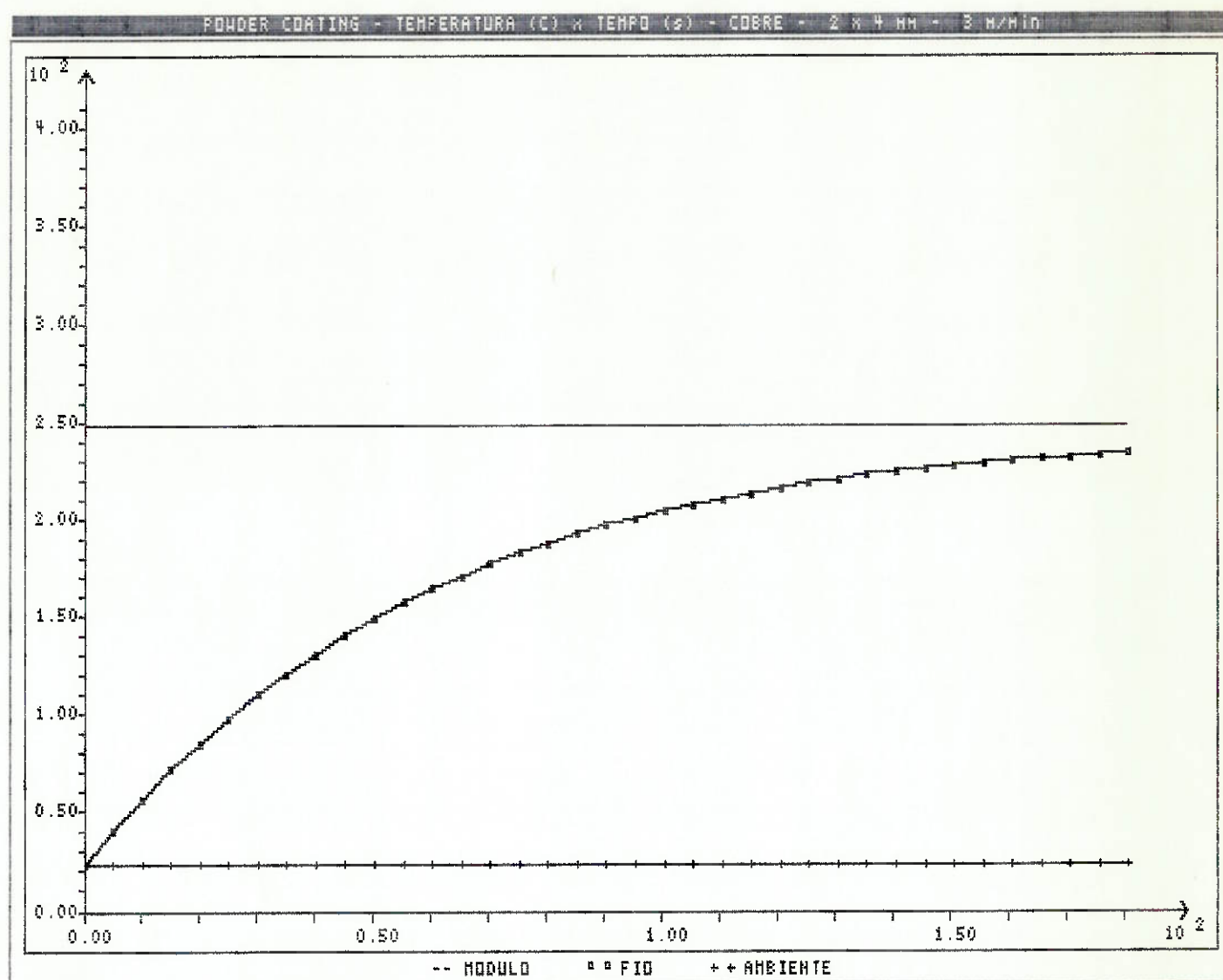


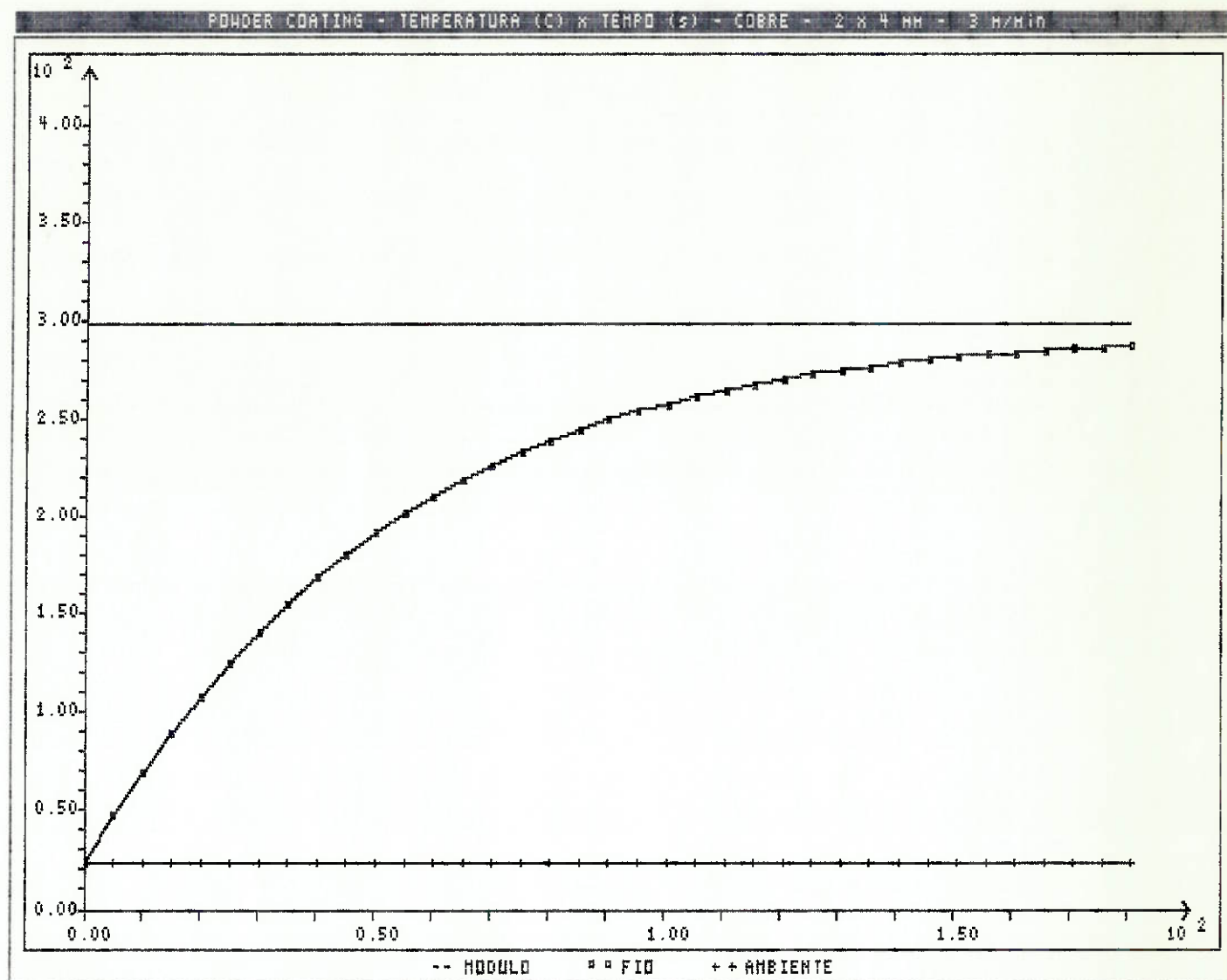




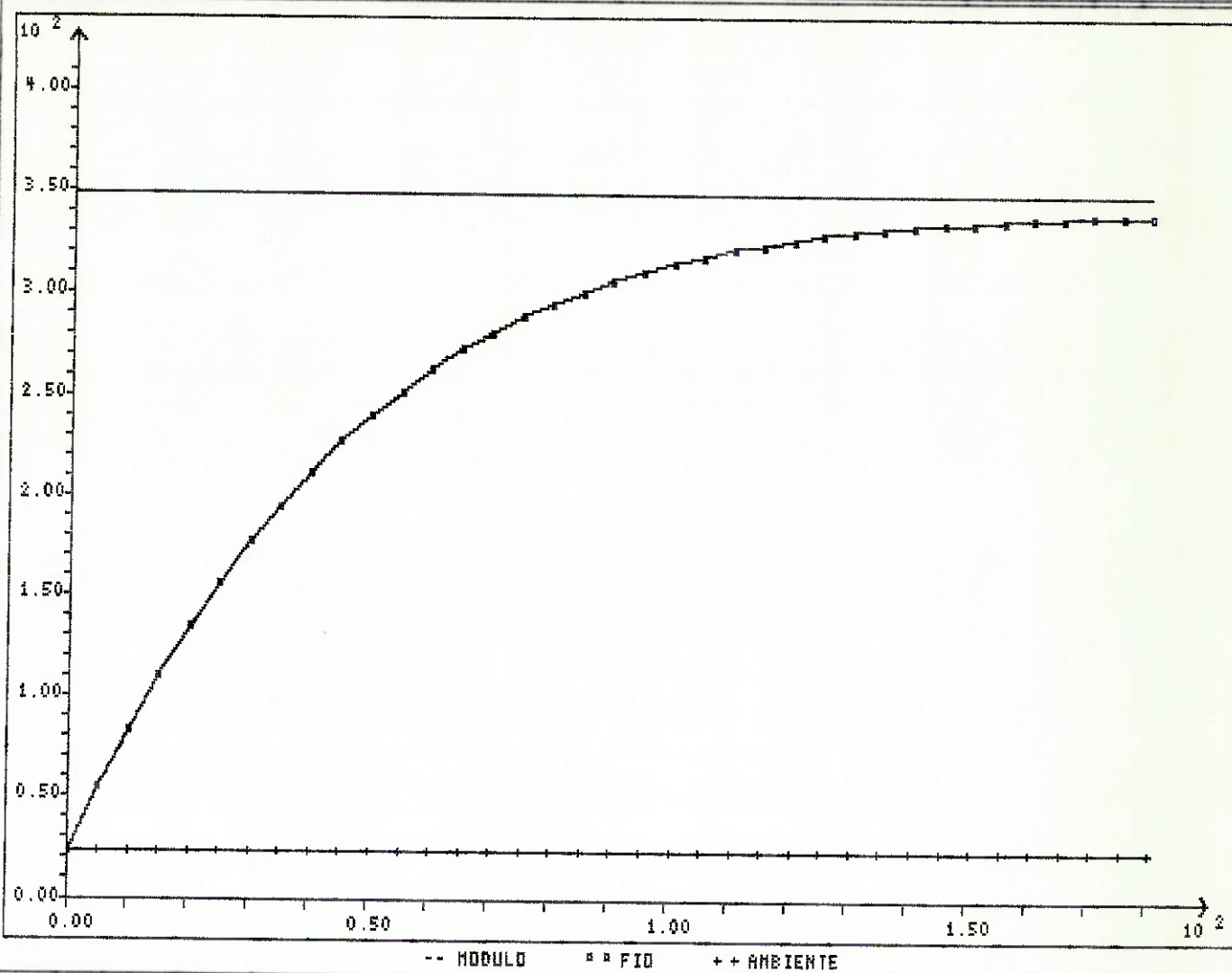


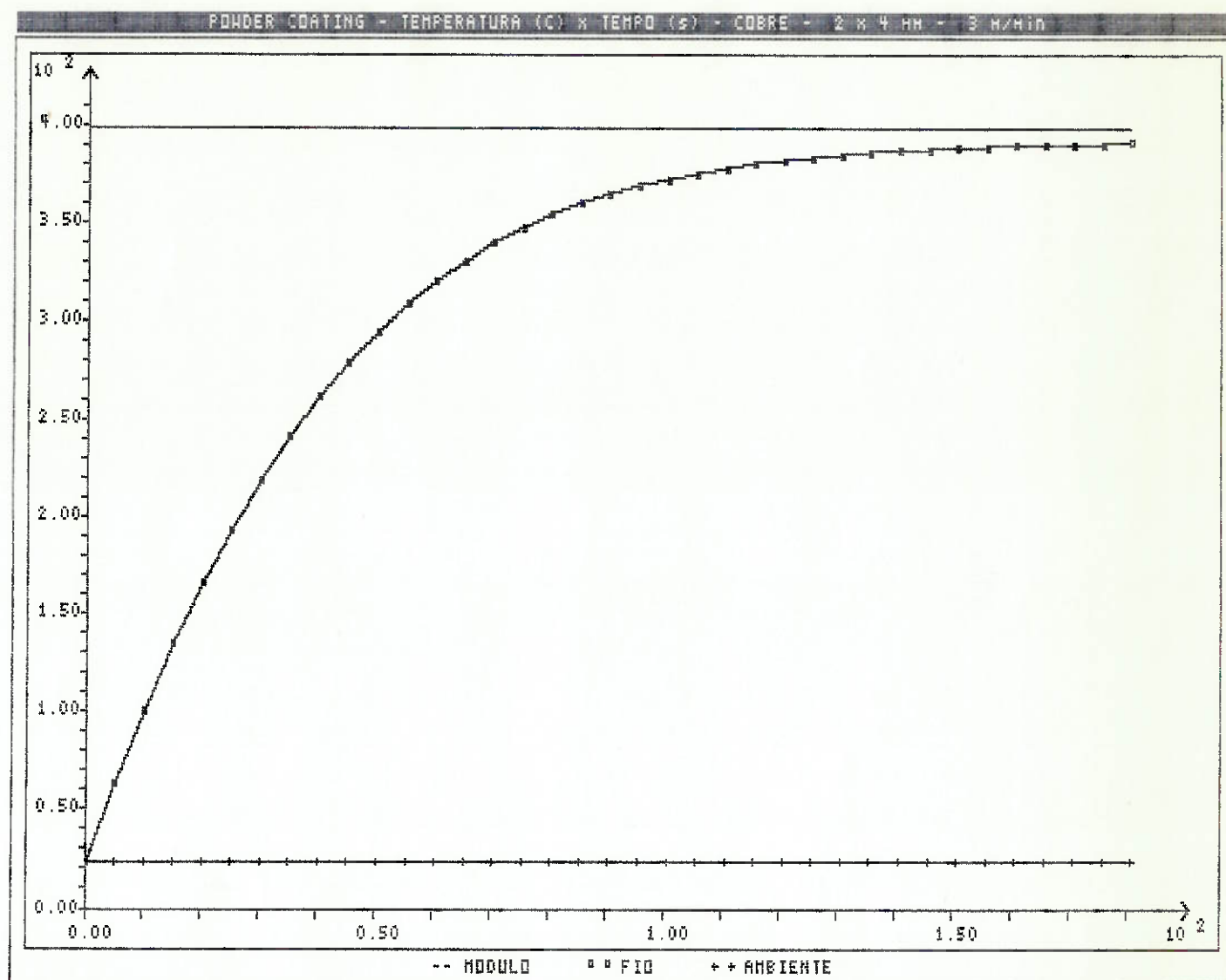


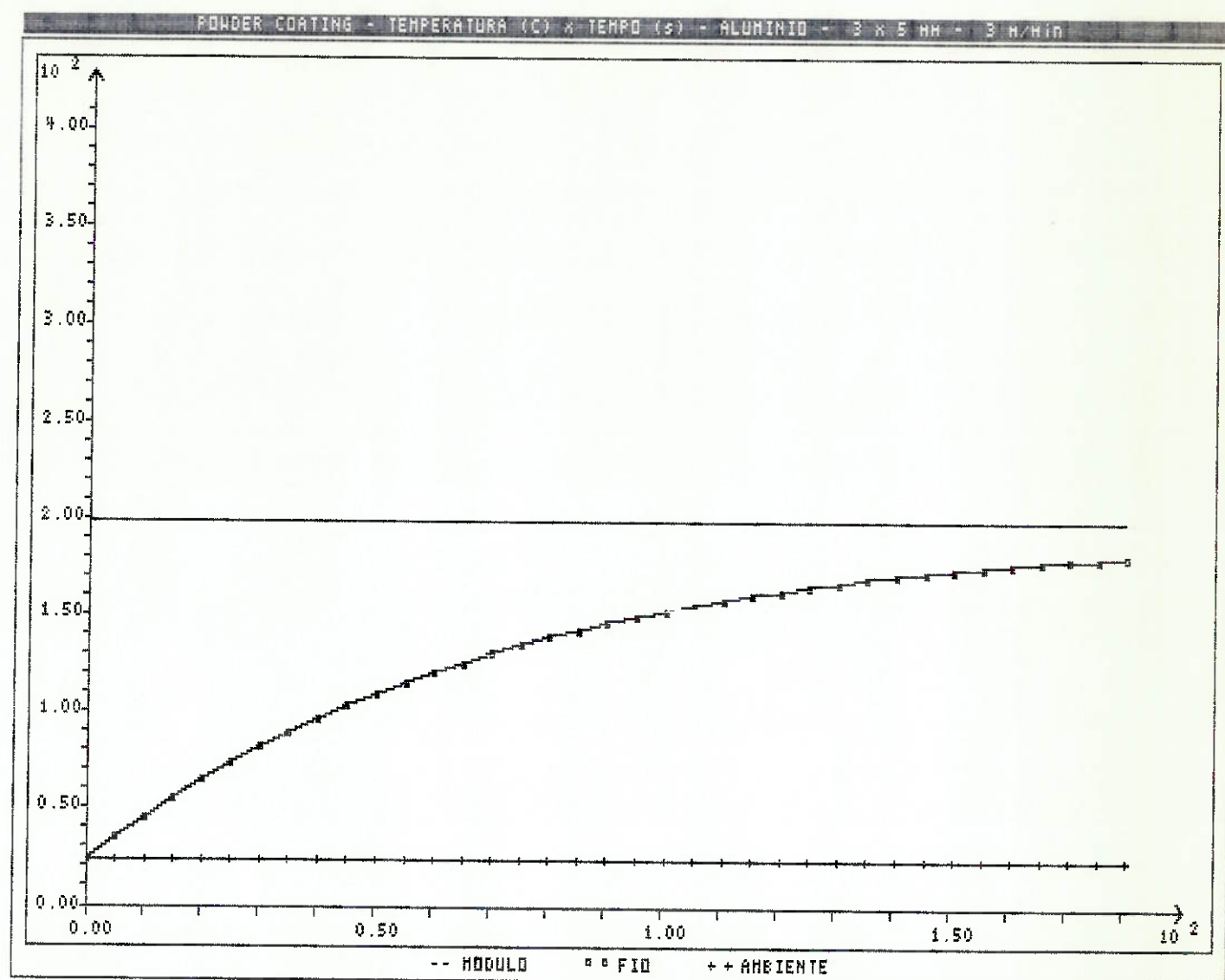


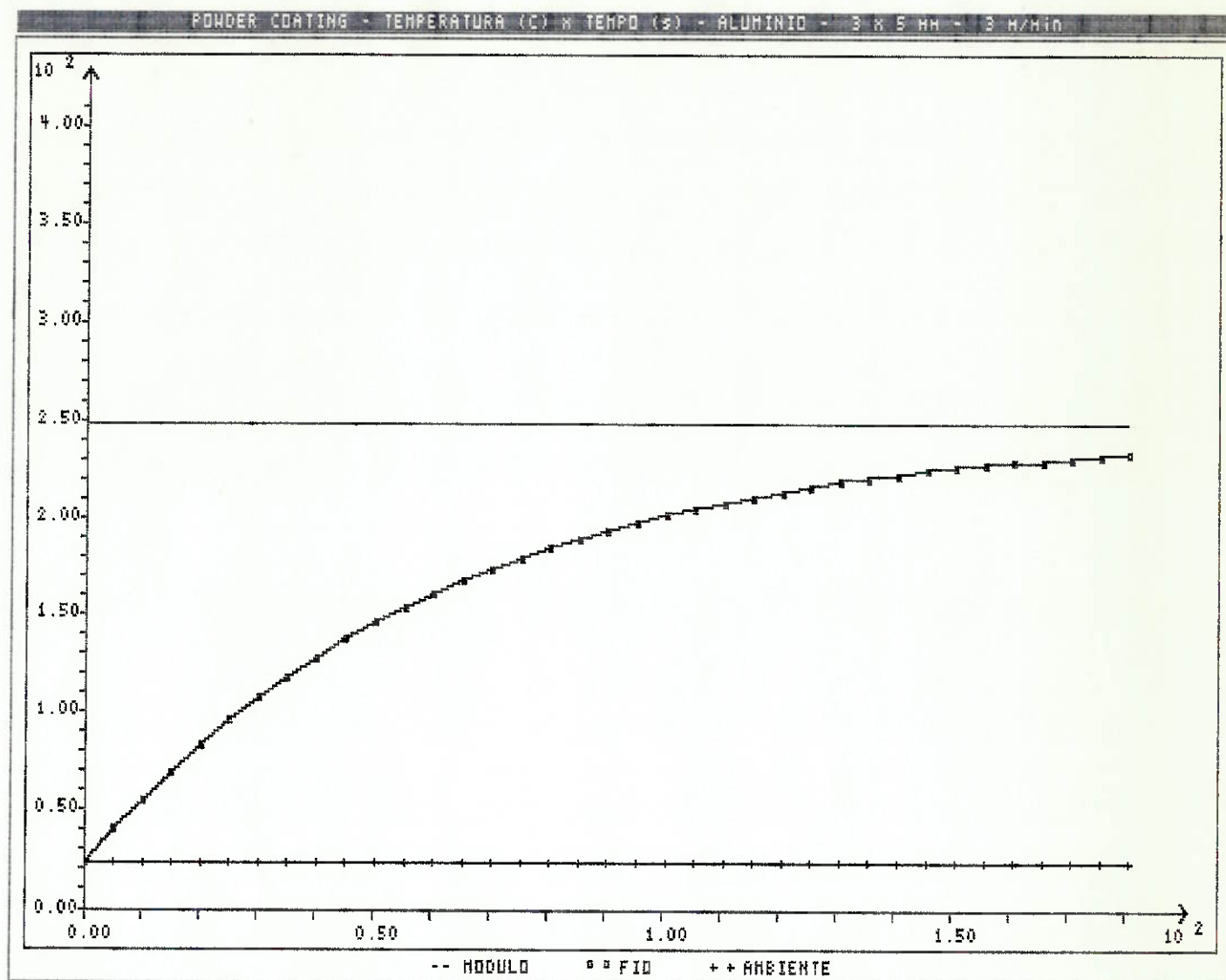


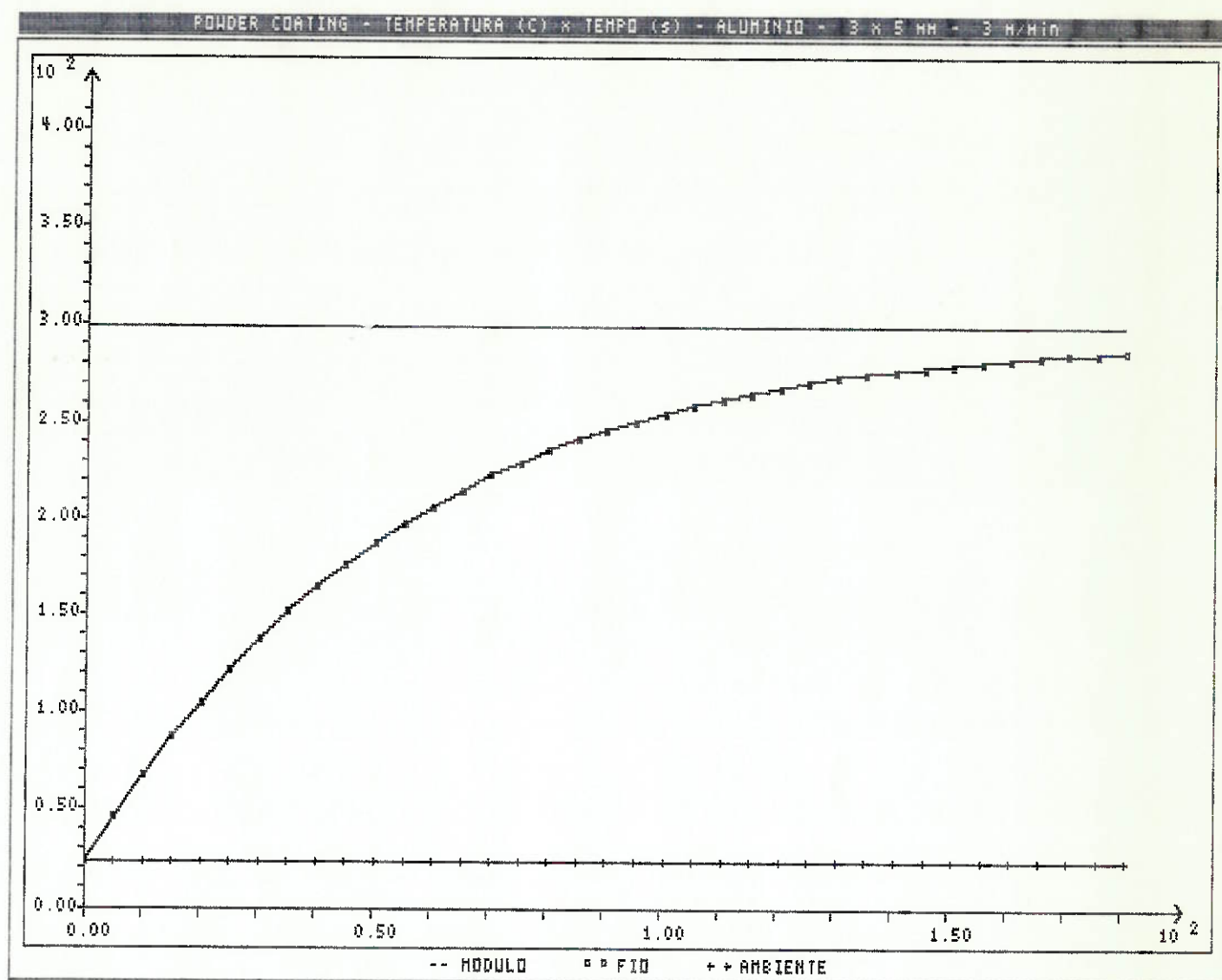
POWDER COATING - TEMPERATURA (C) x TEMPO (s) - COBRE - 2 x 4 mm - 3 M/min

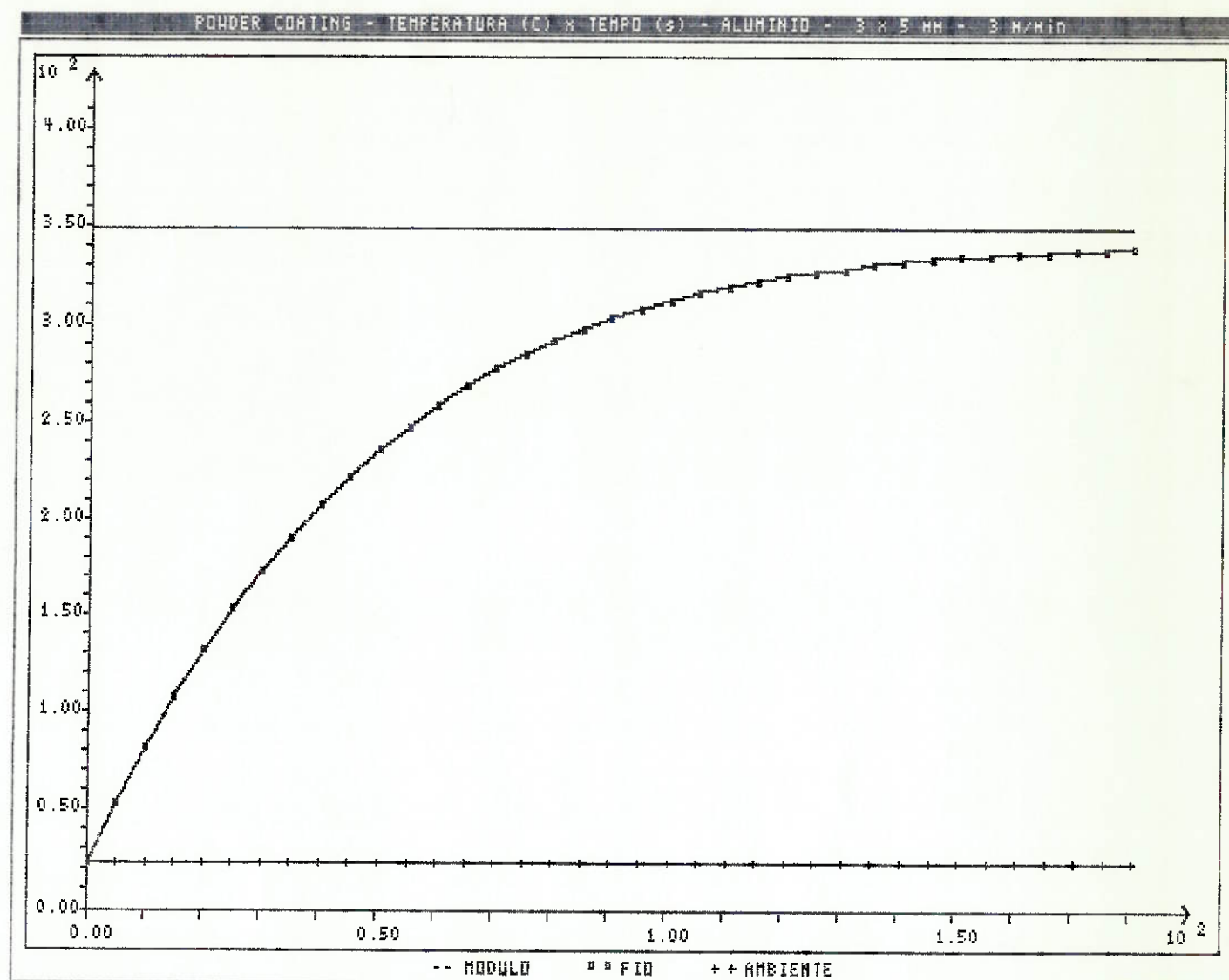


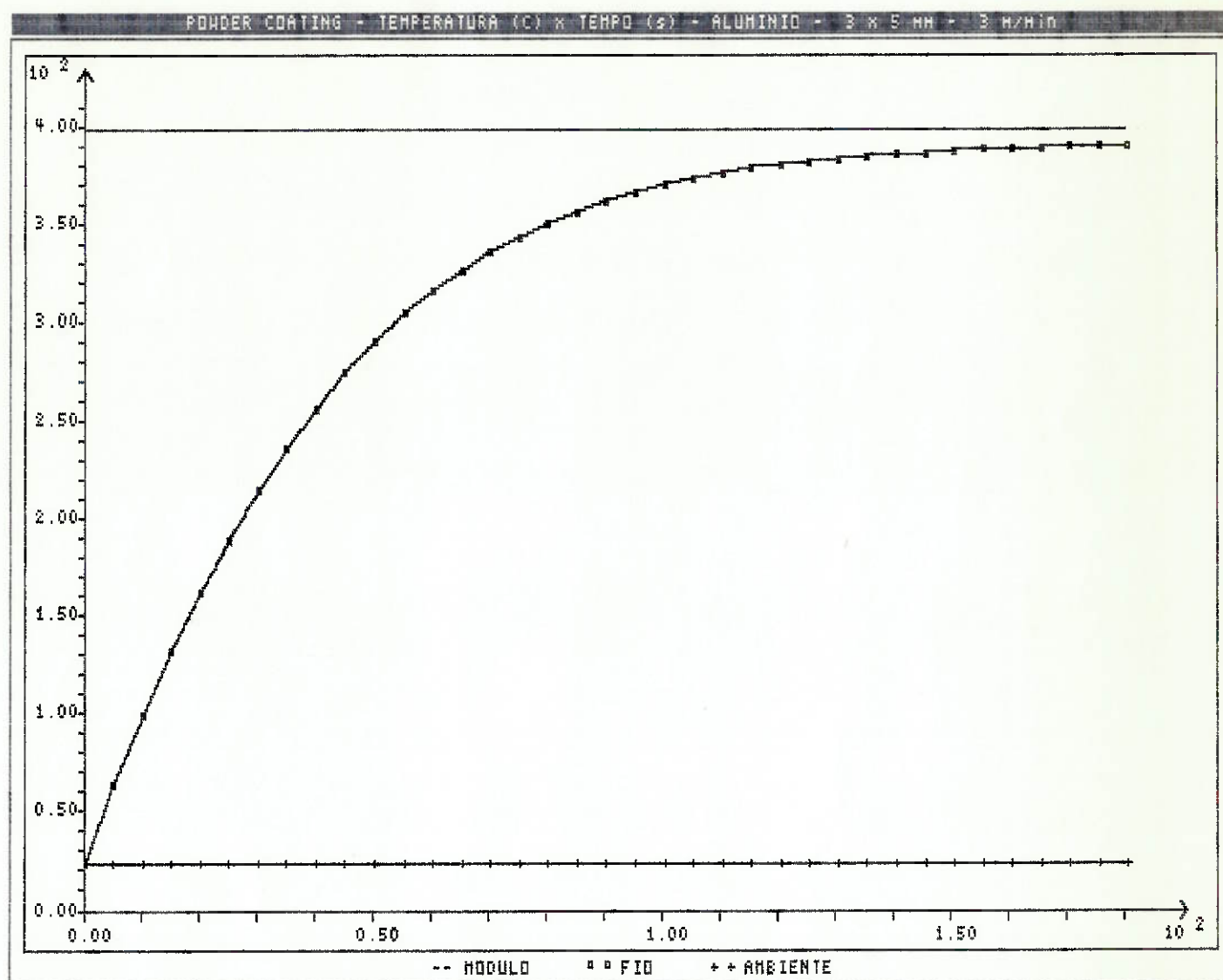




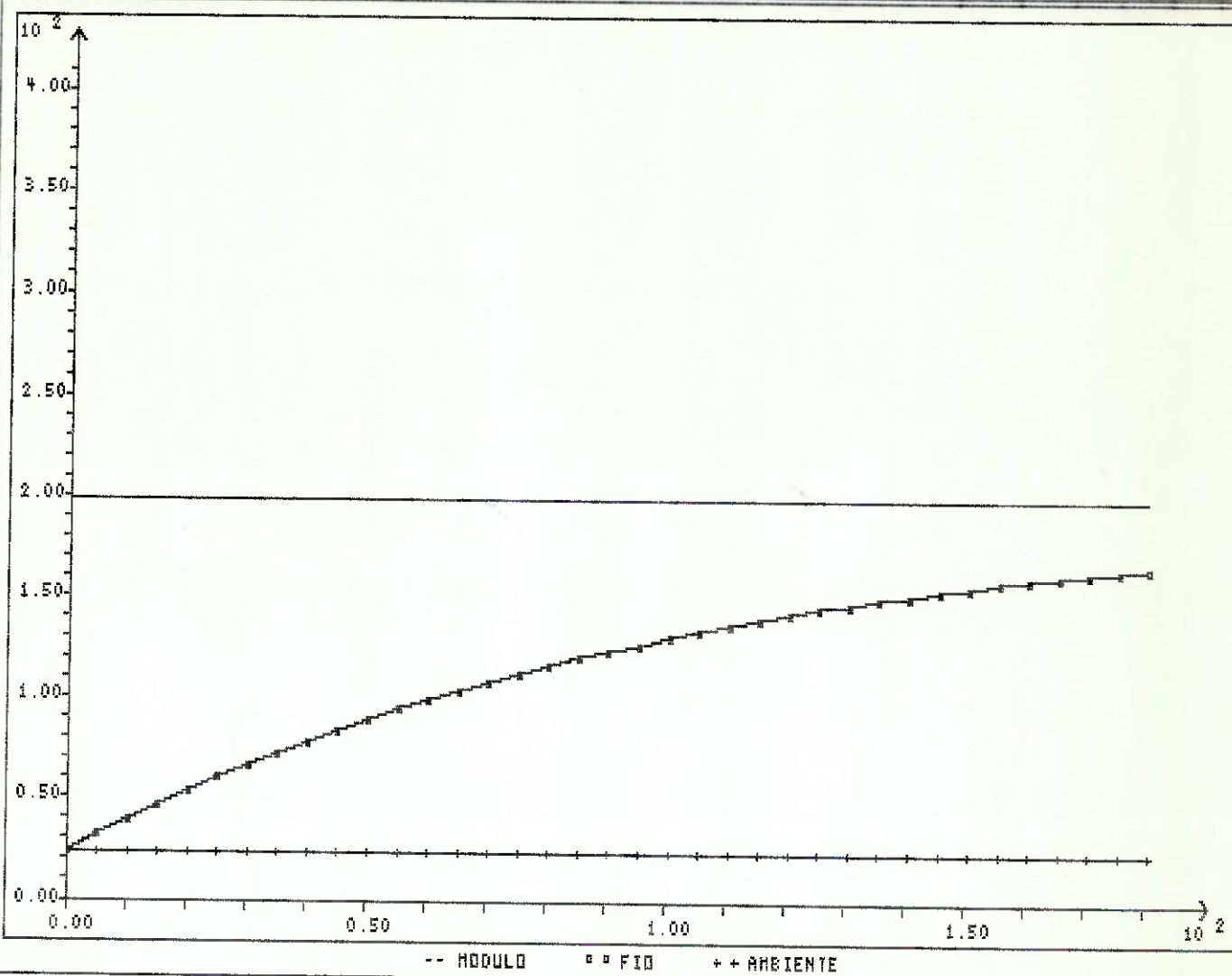


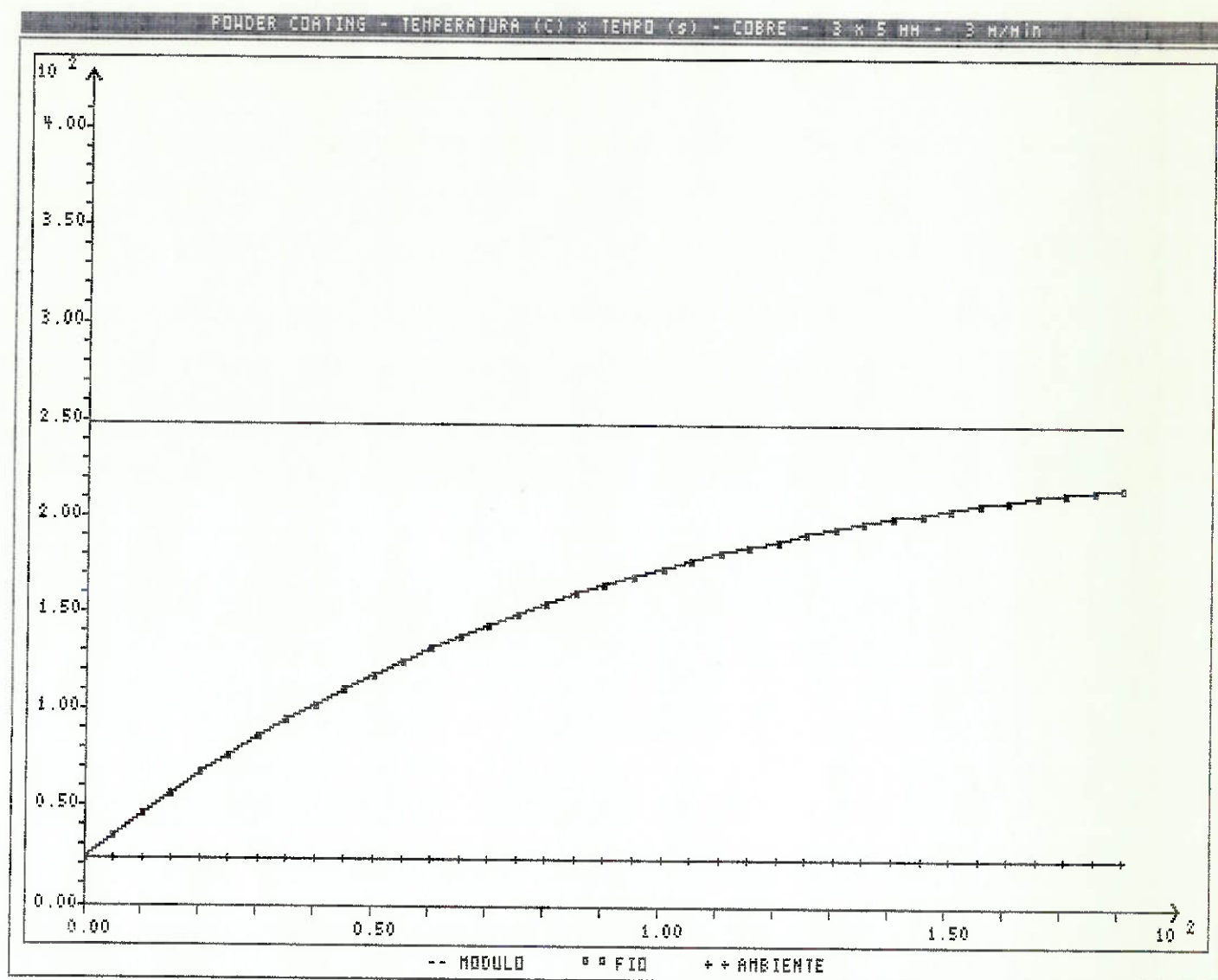


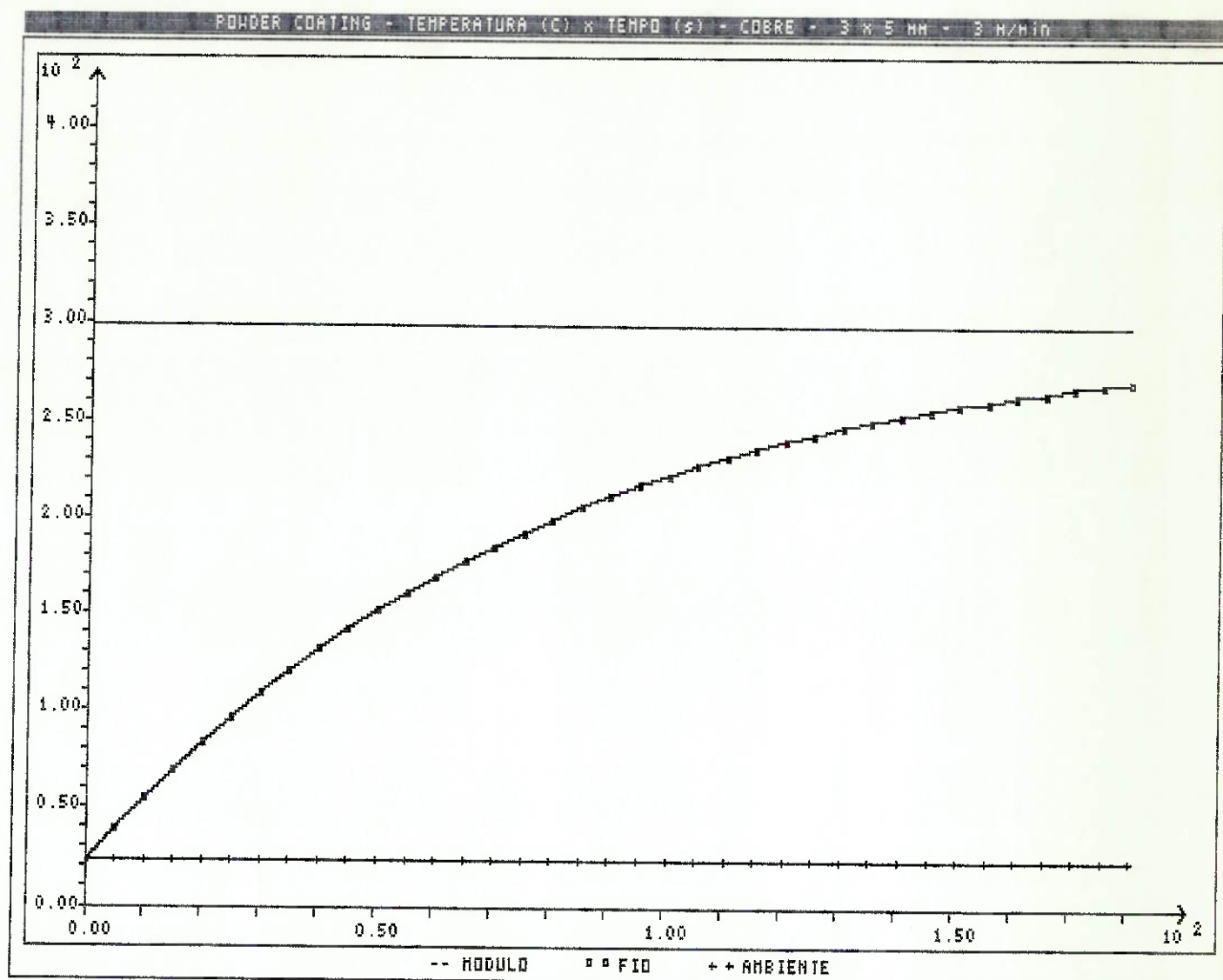


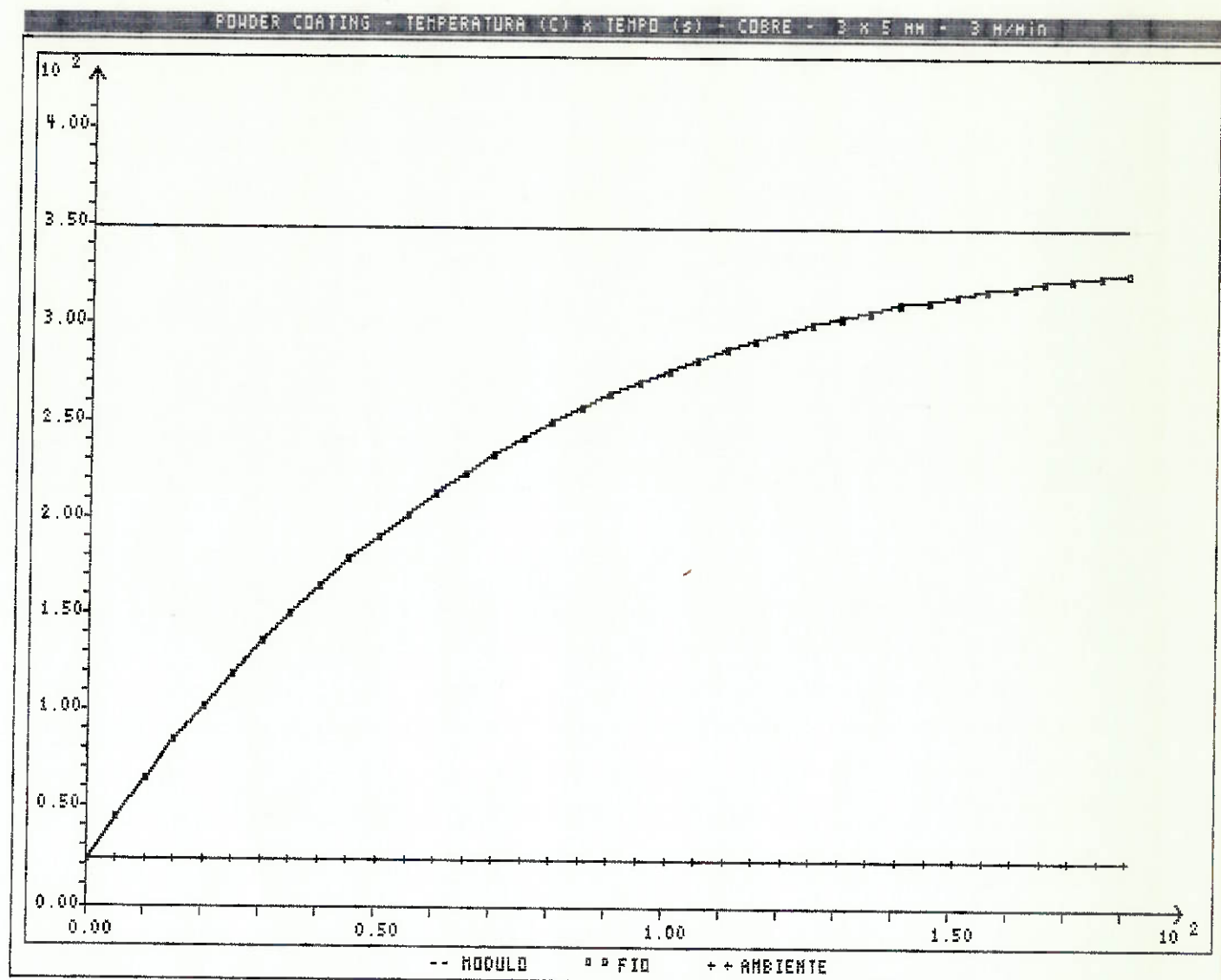


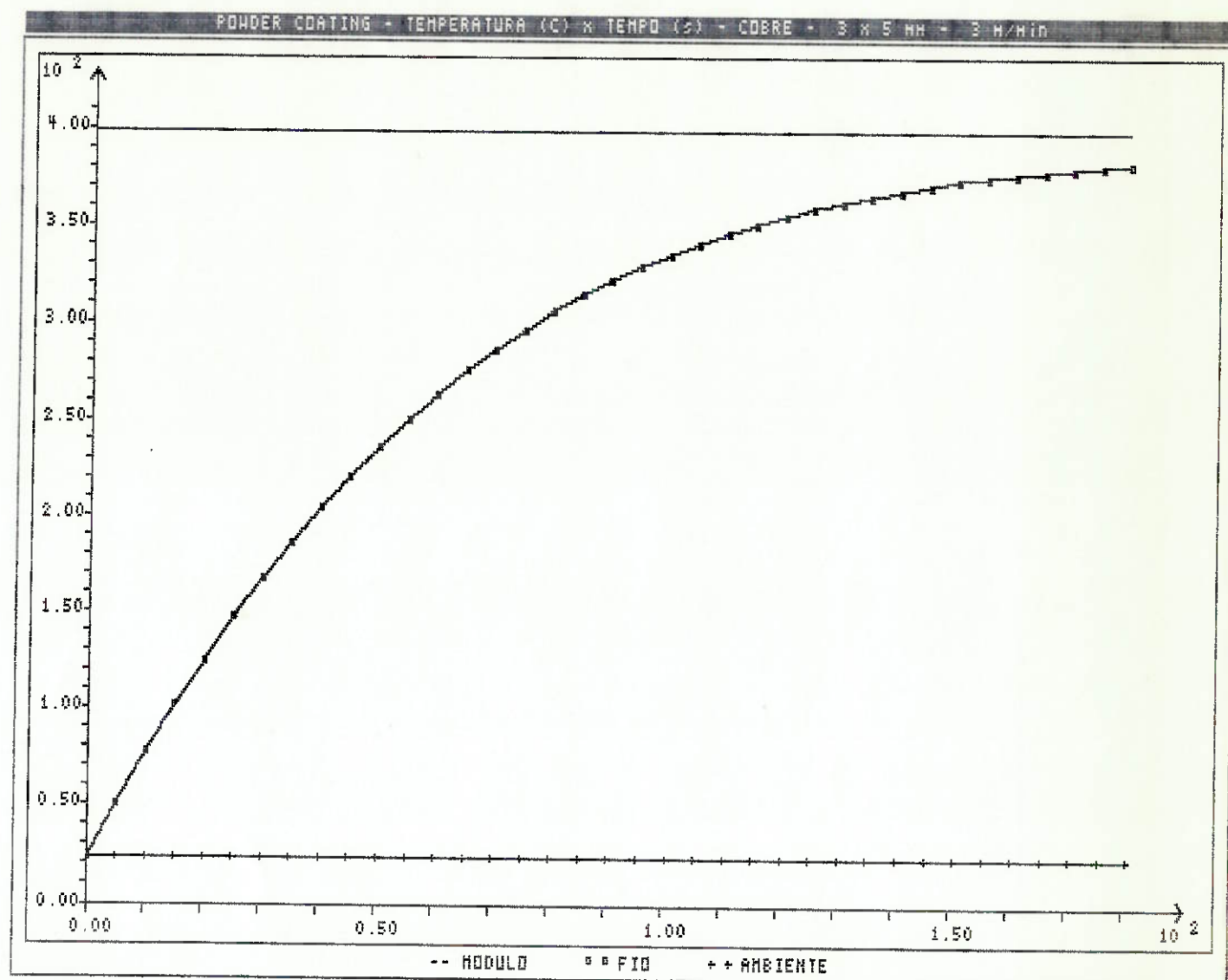
POWDER COATING - TEMPERATURA (C) x TEMPO (s) - COBRE - 3 x 5 mm - 3 M/min

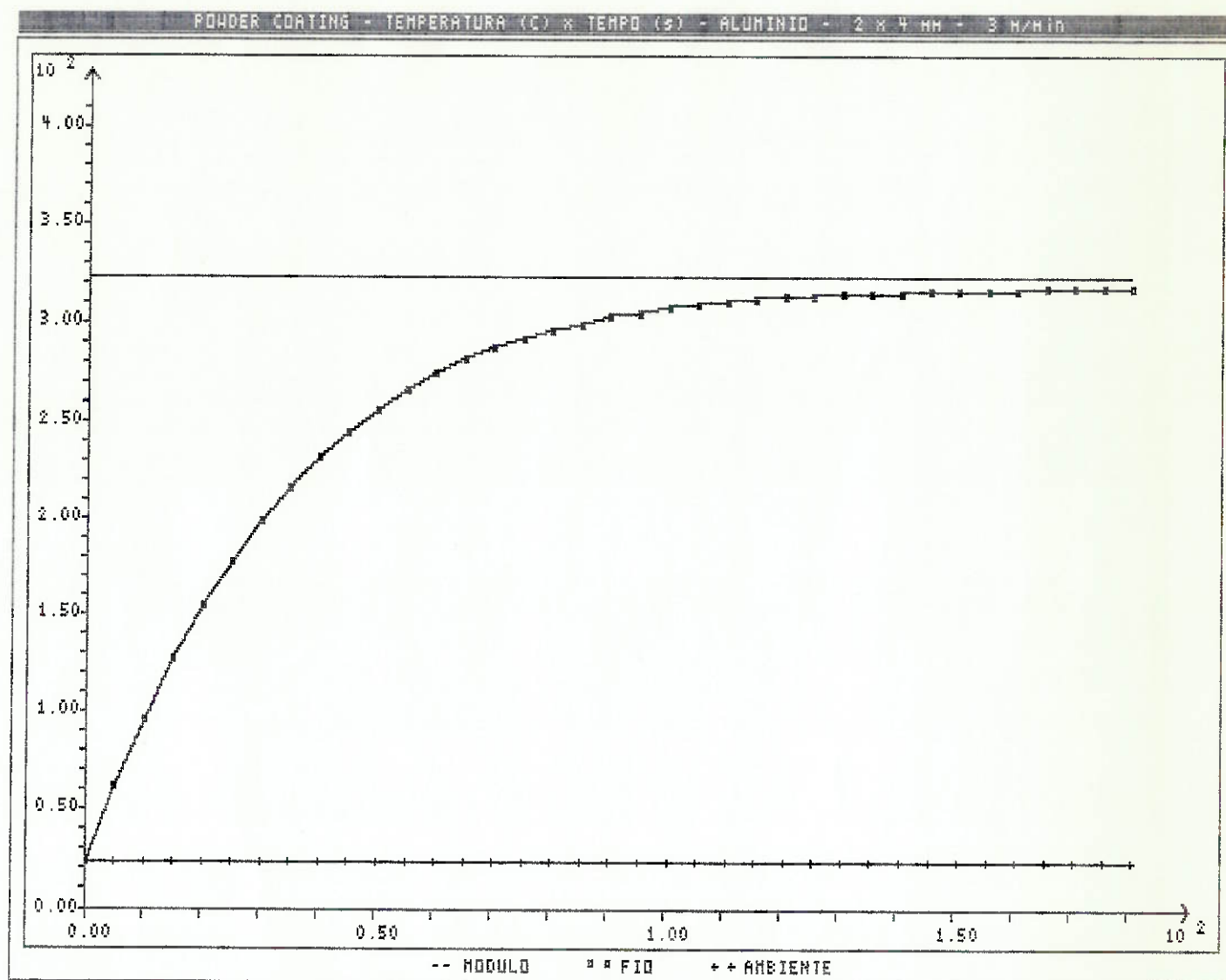












POWDER COATING - TEMPERATURA (C) X TEMPO (s) - ALUMINIO - 3 X 4 MM - 3 M/min

