

Universidade Estadual de Campinas

**FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
DEPARTAMENTO DE ENG. DE ALIMENTOS**

**ESTUDO COMPARATIVO
DE COEFICIENTE DE DIFUSÃO
SEM E COM ENCOLHIMENTO
DURANTE A SECAGEM**

KIL JIN PARK

**Tese apresentada para obtenção
do título de Livre-Docente na Área de
Fenômenos de Transporte**

1987

22e

812/BC

**UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL**

Dedico esta tese à minha
família e aos meus amigos,
aqueles que nos compreendem
e nos apoiam nas situações
mais adversas da nossa vida.

ÍNDICEPÁGINAS

RESUMO

SUMMARY

INTRODUÇÃO _____ 1

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

CONSIDERAÇÕES GERAIS _____ 3

CONSIDERAÇÕES SOBRE O DIMENSIONAMENTO _____ 9

CONSIDERAÇÕES ESPECÍFICAS _____ 10

MATERIAL E MÉTODOS _____ 18

RESULTADOS E DISCUSSÃO _____ 20

CONCLUSÕES _____ 25

TABELAS _____ 26

FIGURAS _____ 31

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____ 50

RESUMO

No presente trabalho, estudou-se a difusão interna durante a secagem de filê salgado de Carcharhinus limbatus, utilizando a segunda lei de Fick para o processo de secagem, com e sem mudança de volume.

Os coeficientes de difusão foram estimados utilizando o método de Gauss-Newton do S.A.S., onde o valor numérico dos coeficientes de difusão para a secagem sem mudança de volume é maior que o valor numérico para a secagem com mudança de volume.

Calculou-se a energia de ativação assumindo a equação do tipo Arrhenius para a difusividade como sendo uma função do inverso da temperatura absoluta.

SUMMARY

The internal diffusion resulted from drying of fillets of Carcharhinus limbatus was studied using Fick's Second Law and considering both drying processes, with and without changes in volume.

The diffusion coefficients were estimated utilizing the Gauss-Newton method from S.A.S. The numerical value of diffusion coefficients for the drying process without volume changes is greater than that of diffusion coefficients for the drying process with volume changes.

The activation energy was calculated, assuming an Arrhenius type equation for moisture diffusivity, and showing clearly an inverse function of the absolute temperature.

INTRODUÇÃO

Baseando-se na existência de grande demanda por peixe salgado e seco no Brasil, e no fato do cação ser uma espécie abundante em águas territoriais brasileiras, portanto apresentando baixo custo, Beraquet e col. (1975) realizaram um estudo do processo de salga e secagem de peixe. Utilizando quatro espécies de peixe, entre eles o cação, os autores colocam que o cação apresenta sabor e textura semelhante ao do bacalhau comumente encontra no mercado.

Torrano e Okada (1977), trabalhando com o cação da espécie Prionace glauca, apresentam um fluxograma do processamento de cação salgado seco.

No relatório interno da SUDEPE, elaborado por Madrid e Coprivá (1984), encontra-se considerações referentes ao desembarque de tubarão nas unidades da federação do Brasil, identificação de principais espécies, características tais como: matéria prima, acondicionamento a bordo, processamento (da carne, da barbatana, da pele, do óleo de fígado e outros) e mercado para tal. Neste relatório, o levantamento de desembarque de tubarão de 1978 a 1982, situa-se de 15 mil a 24 mil toneladas ao ano, ressaltando que no nosso país não existe uma captura dirigida exclusivamente à pesca de tubarão, sendo a sua captura, resultado de uma pesca acidental.

Ciente desta potencialidade, SUDEPE e EMBRAPA, desenvolveram um convênio bilateral sobre o "Projeto Tubarão" no nosso país, com o objetivo de elaborar um pacote tecnológico abrangendo os diferentes aspectos relacionados ao mesmo.

Um dos problemas na exploração industrial foi a obtenção do filé de cação salgado seco, em vista da grande quantidade a ser processada. Para solucionar este problema, Park e col. (1984) desenvolveram o processo e equipamento para a secagem do filé salgado de cação, utilizando o princípio da "Bom

ba de Calor". Receberam pelo referido trabalho a menção honrosa no "XII Concurso Nacional do Invento Brasileiro".

O presente trabalho, decorrente da amplitude do assunto, continua buscando novos dados para aperfeiçoamento do processo.

O objetivo do presente estudo é avaliar a contribuição do encolhimento do material durante a secagem, comparando a difusividade com e sem encolhimento.

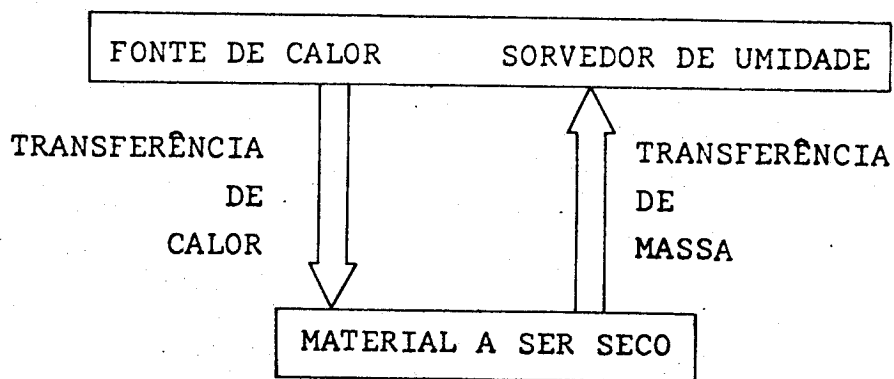
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- CONSIDERAÇÕES GERAIS

Conforme é definido por Porter e col. (1973), a secagem refere-se, em geral, à remoção de um líquido, de um sólido, por evaporação. Os métodos mecânicos de separação entre um líquido e um sólido não são considerados.

Embora a secagem seja um dos métodos mais antigos para preservação de alimentos, a utilização de secagem artificial do alimento é empregado somente nos últimos dois séculos. Entende-se pela secagem artificial, aqueles métodos que empregam a energia diferente da obtida pela exposição direta ao Sol (Ali Asbi, 1982).

Representando o modelo físico de secagem em diagramas temos:

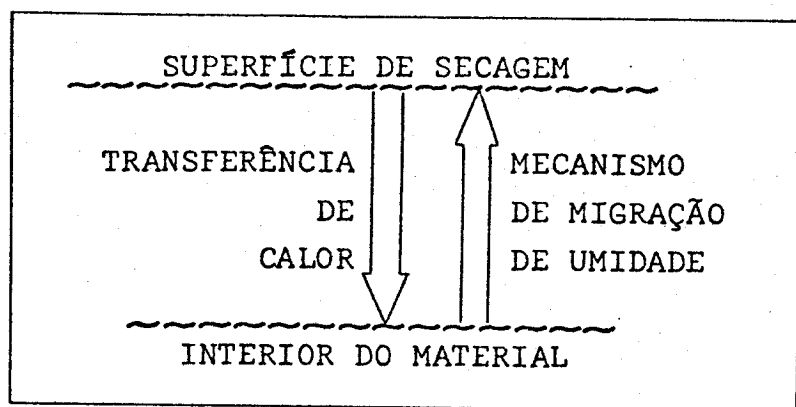


Isto é, durante a secagem, é necessário fornecer o calor para que haja evaporação de umidade no material devendo ao mesmo tempo existir um sorvedor de umidade que atue na remoção de vapor de água, formado a partir da superfície de secagem.

A aplicação quantitativa das relações de transferência simultânea de calor e de massa representa um objetivo da engenharia. Por outro lado, o estudo de secagem não se restringe em termos de análise das condições externas, mas é altamente desejado estabelecer como a água é transportada do inte-

rior do sólido para a superfície de secagem.

Representando em diagramas temos:



Alvarenga e col. (1980) citam como sendo seis os possíveis mecanismos de transporte de água em sólidos:

- 1 - Difusão líquida, devido ao gradiente de concentração.
- 2 - Difusão de vapor, devido ao gradiente de pressão parcial de vapor, causado pelo gradiente de temperatura.
- 3 - Fluxo de líquido e de vapor, devido a diferenças de pressão externa, contração, alta temperatura e capilaridade.
- 4 - Escoamento por efusão, escoamento de Knudsen, os mesmos ocorrem quando o caminho livre das moléculas de vapor, for igual ao diâmetro dos poros. Esse mecanismo só é importante para condições de alto vácuo.
- 5 - Movimento de líquido, devido à força gravitacional, o que não influi significativamente na secagem de alimentos.
- 6.- Difusão superficial, que não é levada em consideração na maioria das teorias existentes, pelo fato de ser praticamente desprezível.

Uma extensa revisão bibliográfica para a secagem de materiais biológicos foi efetuada por Daudin (1983), envolvendo cento e sessenta e duas referências, apresentando doze tipos de curvas de secagem, explanando cinéticas de secagem e trazendo equações empíricas existentes para as curvas de seca

gem de materiais biológicos.

As mais importantes teorias de secagem são aquelas que tentam explicitar os fenômenos físicos internos que governam o período da taxa decrescente de secagem. Dentre muitas teorias existentes, o problema reside em encontrar a teoria aplicável aos materiais biológicos dentro da validade de hipóteses pertinentes a mesma.

Apresentando uma rápida explanação das importantes teorias existentes, começamos com a "teoria difusional" onde Lewis (1921) analisa a secagem com a equação de segunda lei de Fick, assumindo o perfil linear de concentração de umidade no material, e expressando a razão da umidade livre removível inicial e umidade removível momentânea em função exponencial do tempo de secagem, onde a umidade livre é a umidade do material menos a umidade do equilíbrio. Por outro lado, durante a secagem, o estabelecimento do perfil de concentração da superfície ao centro do material, não é instantâneo, existindo um limite de separação da zona úmida (central) e zona seca (superficial). Esta interface (limite de separação) move-se para o centro do material durante a secagem, conseqüentemente o perfil estabelecido é do centro até esta interface. A espessura do material, onde existe este perfil estabelecido, controla a secagem através da difusão. O autor denomina esta camada de "efeito pelicular". Devido a existência dessa camada há necessidade da utilização de um fator de correção. Sherwood (1929) classifica como sendo quatro os tipos de mecanismos de secagem em termos de resistência interna versus resistência externa, isto é resistências em termos de movimento líquido, de difusão de vapor, de difusão na camada limite do ar externo e de difusão no ar externo. Utilizando a equação de Fick para sua análise, demonstra que a equação com fator de correção por Lewis coincide com a solução em série de Fourier durante os primeiros períodos até a remoção de sessenta por cento da umidade.

de livre, nas condições de resistência externa desprezível. Em outro artigo, Sherwood (1929 b) mostra a existência de duas zonas distintas de período de taxa decrescente, recomenda a utilização da palavra difusional em secagem como referência somente à migração interna de umidade no sólido.

Estes dois autores (Lewis e Sherwood) foram os que iniciaram o tratamento de secagem com teoria difusional, isto é, expressando o fluxo de transferência de massa na secagem como sendo função de gradiente de concentração de água.

Outra teoria importante refere-se a "teoria capilar". Harmathy (1969) e Philip (1975) citam Buckingham (1907) como sendo o criador do conceito de "potencial capilar", análogo à "potencial gravitacional", e ainda, o introdutor do postulado do mecanismo de "escoamento capilar insaturado". Utilizando a lei de Darcy, que relaciona a velocidade de escoamento como sendo função do potencial e condutividade hidráulica, Buckingham sugere a mesma equação para o capilar insaturado com a devida modificação na condutividade hidráulica, que passará a ser função da fração volumétrica de água.

Temos ainda, a teoria de evaporação-condensação", que assume a migração de umidade nos poros como uma ocorrência na fase gasosa. De Vries (1975) assume os pesquisadores, Krischer e Rohnalter (1940) como sendo os primeiros a sugerir a influência do movimento de vapor na transferência de calor no meio poroso, onde o fluxo de vapor é função da difusividade de vapor de água, pressões parcial e total. Harmathy (1969), em seu trabalho, demonstra que a transferência de massa no período da taxa decrescente de secagem, ocorre unicamente na forma de vapor. Estes estudos em meios capilares-porosos, provenientes das ciências de solos trazem como decorrência uma impor-tante teoria "transferência simultânea de calor e massa", ou seja, afirmações de que a transferência de calor não depende somente de condução térmica mas depende também da redistribui

ção da massa ("efeito Dufour"), e a transferência de massa é determinada não só pela diferença de potencial químico, mas depende também da difusão térmica ("efeito Soret"). De Vries (1975) explica que estas teorias macroscópicas de transferências de calor e massa combinadas, tem sido desenvolvidas por dois caminhos diferentes. No primeiro, identifica-se os fenômenos das transferências separadamente e então desenvolve-se equações de fluxo de calor e massa baseando-se nos modelos físicos do sistema. No segundo aplica-se os formalismos de termodinâmicas irreversíveis (ou de não-equilíbrio) para as transferências simultâneas de calor e massa, e então, tenta-se identificar as forças e fluxos relevantes. Os fluxos resultantes são então expressos em função linear de forças, através de relações fenomenológicas.

A teoria descrita na primeira linha foi desenvolvida primeiramente por Philip e De Vries (1957).

O modelo baseia-se no conceito de escoamento viscoso de água líquida, sob a influência das forças: de gravidade, capilar e adsorção, e no conceito de escoamento de vapor difusional. Uma explanação dos conceitos envolvidos no tratamento do escoamento de água no solo foi descrito por Philip (1975).

A teoria descrita na segunda linha, é definida quantitativamente como sendo uma transferência de certa quantidade de energia. Foram Luikov e Mikhaylov (1965) e Luikov (1966) que introduziram a aplicação de termodinâmica irreversível para tratar as transferências simultâneas de calor e de massa. Luikov (1966), para quantificar esta transferência de energia, cria o potencial de transferência como sendo a derivada parcial da função característica desta energia, com respeito às coordenadas utilizadas na análise. Ou seja, na transferência de calor, e potencial de transferência é a temperatura na coordenada de entropia, e análogamente, na transferência de massa teríamos o potencial de transferência de umidade apro-

priado para cada análise. A escolha apropriada do potencial para a transferência de massa dependerá do conhecimento do fenômeno, obedecendo a analogia com a transferência de calor, inclusive em termos de capacidade termica (calor específico), definido em termos de "capacidade de umidade" (Keey, 1972), para a transferência de massa.

A tentativa de aplicação destas equações termodinâmicas para os materiais biológicos pode ser vista no trabalho de Husain e col. (1972 e 1973).

Fortes e Okos (1978) tem dispendido esforços para a utilização deste conceito de termodinâmica irreversível para materiais biológicos e afirmam que é melhor introduzir a modificação na força motriz, como sendo um gradiente de teor umidade de equilíbrio. Como exemplo, podemos citar o trabalho de Fortes e col. (1981) na aplicação do mesmo, para a secagem e umidificação. Fortes e col. (1982) visam com seu trabalho a modelagem do processo de seca-aeração.

Nakano e Miyazaki (1979) desenvolveram, com maestria, a equação de Fick mais geral até o ponto de obterem as equações termodinâmicas para as transferências, demonstrando como os coeficientes podem ser determinados fisicamente.

Whitaker (1980), desenvolve uma análise fenomenológica rigorosa, utilizando as equações de transferências de quantidade de movimento, de calor e de massa para o meio poroso "granular". O autor define o termo "granular" como sendo um meio poroso de fase sólida, rígida, que não contém umidade. E afirma que devido a esta restrição a teoria resultante não é diretamente aplicável à secagem de materiais biológicos.

O desenvolvimento das equações fenomenológicas de transferências é feito em termos de três fases (fase sólida, fase líquida e fase gasosa).

CONSIDERAÇÕES SOBRE O DIMENSIONAMENTO

Devemos lembrar que a umidade crítica é importante do ponto de vista do dimensionamento, uma vez que limita as duas regiões diferentes para o tratamento de dados.

Os tratamentos convencionais de dimensionamento podem encontrar-se em livros tais como: Heldman (1975), Keey (1972), Charm (1971), Loncin (1965), Nonhebel (1971), Van Arsdel (1963).

Enfocaremos aqui considerações a respeito das tentativas de normalizações das curvas de secagem.

Keey (1972), utilizando o corpo poroso idealizado, mostra como podem ser avaliados as resistências, em outras palavras, é o número de Biot que relaciona a resistência interna em termos de difusividade, tortuosidade e porosidade, e a resistência externa, em termos de resistência na camada limite. Utilizando a umidade crítica e referenciando o valor de taxa constante de secagem, relacionam as taxas relativas em função da umidade abaixo da umidade crítica ou em função do próprio número de Biot.

Na mesma linha de raciocínio, Fornell e col. (1980), apresentam a curva generalizada de secagem como sendo a taxa relativa de secagem em função do adimensional de umidades.

Schlünder (1983), afirma que a secagem, em geral, pode ser tratada tendo como base a secagem de um material mais ou menos higroscópico. Ressaltando que as taxas de secagem no período decrescente devem ser encontradas experimentalmente, independente da existência de um ou mais períodos. Afirma ainda que, embora existam muitos trabalhos que estipulam a taxa de secagem nesta (s) região (s), os parâmetros fundamentais, tais como difusividades de transferências de calor e massa, não são avaliáveis usualmente e ainda apresentando maiores dificuldades no caso de produtos naturais.

A normalização recomendada por Schlünder (1983) também é feita através de adimensionais de taxas de secagem e conteúdos de umidade.

CONSIDERAÇÕES ESPECÍFICAS

Jason (1965) considera o músculo de peixe como sendo gel, possuindo um meio isotrópico à qualquer conteúdo de umidade. Comentando a evaporação superficial, cita a influência da espessura da camada limite do ar que controla a difusão de água na superfície, sendo facilmente verificada no início do processo de secagem. No caso de músculo de peixe, inicialmente possuindo um teor de umidade de 400 por cento, a taxa de secagem pode ser considerada constante até o conteúdo de umidade de 100 por cento em relação ao peso seco.

Durante este período de taxa constante de secagem, a evaporação da água ocorre de uma superfície saturada. Powell (1940), trabalhando com: esfera, cilindro, placas, retangular e circular; mostra a influência da velocidade do ar, das características geométricas da superfície e dos efeitos de bordas de entrada, na evaporação. Baseando-se nestas considerações aerodinâmicas da superfície saturada de Powell, Jason (1958) mostra que o processo pode ser aplicado igualmente para o filé de pescado, trabalhando com o filé retangular. Neste período de taxa constante de secagem, o autor apresenta equações empíricas visando prever a evaporação de água em função da diferença da temperatura do ar e da temperatura de bulbo úmido. Incluindo a influência da velocidade do ar, a correção poderá ser feita através do expoente nesta diferença de temperaturas.

O conteúdo de umidade do material correspondente ao ponto de separação entre o período de "taxa constante" de secagem e o período de "taxa decrescente" de secagem, denomina

se umidade crítica (Daudin, 1983; Jason, 1965; e outros). No entanto, baseando-se nas explicações fenomenológicas, Keey (1972), utilizando um corpo poroso idealizado, mostra que o ponto de inflexão nas curvas de secagem, ou seja, a definição do "ponto crítico" para os materiais porosos não higroscópicos é assumida como sendo o ponto que corresponde a mudança da umidade do estado fenicular para o estado pendular. Ainda, devido a dificuldade em detectar e consequentemente distinguir o período de taxa constante de secagem em relação ao período de "indução" na secagem de materiais biológicos, denomina-se o primeiro ponto de inflexão como sendo o ponto "pseudo-crítico".

Independente de fornecer ou não este tipo de explicações fenomenológicas, é indiscutível a utilização preferencial da 2ª lei de Fick para seu período de taxa decrescente na secagem de materiais biológicos (Daudin, 1983), devido principalmente ao ajuste de dados experimentais que esta equação fornece.

Falando da utilização da 2ª lei de Fick, consequentemente da resolução da mesma, podemos citar Carslaw e Jaeger (1959), Crank (1975) e Skelland (1974) que apresentam as resoluções matemáticas independente de as terem nas utilizado para a secagem. As deduções matemáticas assim como exemplos de aplicação podem ser visto no trabalho de Park (1980).

As análises de secagem feitas com a utilização da equação de Fick, enfocam principalmente o estudo do efeito global do fenômeno interno, consequentemente não apresentando condições da descrição dos possíveis mecanismos internos de migração de umidade, ou outro fenômeno físico em particular. Portanto, o coeficiente global denominado de "difusividade efetiva", englobando todos os possíveis efeitos internos.

Ajustando os dados experimentais nesta equação, assume-se as seguintes hipóteses:

1. a difusividade é constante

2. o material que está sendo seco é homogêneo
3. não há variação nas dimensões do material durante o processo de secagem
4. a superfície de secagem está em equilíbrio com o ar de secagem
5. o conteúdo de umidade do material tende para a umidade de equilíbrio
6. o movimento de água resulta do gradiente destas umidades

Informações sobre trabalhos relacionados nesta área no nosso país e na América Latina, podem ser vistas no trabalho de Chirife e Brunello (1980), onde os autores relacionam os tópicos, centros e autores envolvidos em secagem.

Devido a grande utilização da equação de Fick deve-se ressaltar como ponto importante, a utilização de soluções aproximadas. Além dos trabalhos de Lewis (1921) e Sherwood (1929 a,b), podemos citar ainda Becker e Sallans (1955) que propõe uma solução gráfica baseando-se nos números adimensionais, análogo a transferência de calor por condução. A detecção da existência de duas difusividades neste período de taxa decrescente de secagem (Jason, 1958) e consequentemente o tratamento separado destas duas regiões utilizando o primeiro termo de série de Fourier, podem ser vistos nos trabalhos de Mazza e Lemaguer (1980) e de Aguerre e col. (1982).

Dentro das hipóteses assumidas na resolução da equação de Fick, a hipótese da difusividade constante é contestada por Van Arsdell (1947). O autor propõe uma solução numérica aproximada que apresenta as vantagens de não considerar duas principais suposições, concentração líquida como potencial de transferência e a difusividade constante, argumentando que os efeitos da mudança na temperatura e difusividade podem ser imputados na pressão de vapor. Portanto, o potencial de transferência deve ser a pressão de vapor, o presente autor, salienta sua escolha justificando que estes possíveis efeitos devem estar im-

butidos no potencial de transferência e não nas propriedades dos sólidos.

King (1968) cita algumas discrepâncias nos trabalhos publicados que consideraram a transferência como sendo difusão líquida e desenvolve equações em termos de transferência difusional interna, ocorrendo somente na fase de vapor. O autor analisa três situações:

- 1^a: Onde a resistência interna controla o processo de secagem
- 2^a: Onde a resistência tanto interna como externa, controlam o processo de secagem
- 3^a: Onde a resistência externa controla o processo de secagem

Nesta linha de contestação com suposição de difusividade de constante, Whitaker e col. (1969) e Hsu (1983) analisam o modelo difusional através do coeficiente de difusão variável. Aguerre e col. (1985) apresentam a solução numérica da equação de Fick, considerando o coeficiente de difusão variável, conforme as seguintes funções, arbitrariamente escolhidas: exponencial, potencial e hiperbólica. Mostram que para os limites escolhidos nos valores numéricos de Fourier, entre 0,15 e 0,50 para a esfera, 0,20 a 0,90 para a placa, o logaritmo da concentração adimensional fica sendo uma função linear do número de Fourier nestes intervalos, independente da função que expresse a variação do coeficiente difusional. A conclusão destes autores é de que a obtenção de uma reta na relação do logaritmo de concentração adimensional versus o número de Fourier não significa que o coeficiente difusional seja constante.

A maioria dos materiais biológicos são considerados como coloidais higroscópicos que exibem o fenômeno conhecido como "endurecimento superficial" (Van Arsdel e Copley, 1963).

Existem basicamente duas explicações sobre o fenômeno de endurecimento superficial na secagem. São elas:

- 1^a) a secagem superficial é muito rápida, não permitindo a re-

posição de água pelo interior do material na mesma velocidade da retirada superficial.

2º) existe a formação da crosta superficial que impermeabiliza a superfície, impedindo a saída de água.

Do ponto de vista estritamente matemático e fenomenológico, a primeira suposição é rebatida pois quanto mais rápida a secagem, mais rápida a promoção de gradiente de umidade no interior do sólido, promovendo e acelerando a transferência de massa. Portanto, a justificativa mais utilizada é a de que a 2ª explicação que inclui considerações tais como a existência de reação química ou presença de solutos que alteram as características de superfície de secagem, é mais correta.

No trabalho de Torrano e Okada (1977) as mantas de cação salgado prensado são secas entre 40°C a 65°C / 70% de umidade relativa. Apresentam a variação de umidade em função de tempo de secagem, tentam explicar que a secagem sem pele, seca mais lentamente em relação ao prensado com pele através de endurecimento superficial. A presença de cristais de sais na superfície da manta sem pele, impede a saída de H_2O , ao passo que com pele, esta atuaria como atenuador destes tipos.

Desconhecemos a quantificação do fenômeno de endurecimento superficial, deixando pois este efeito para ser respondido através das experiências práticas.

Por outro lado, a consideração a respeito de efeitos colaterais na secagem que mereceu a atenção especial no caso de materiais biológicos é a suposição de desprezar os efeitos da variação nas dimensões, isto é, o encolhimento dos materiais durante a secagem.

As células vivas, de origem animal ou vegetal exibem um determinado comportamento, denominado "turgor", onde o líquido distende a parede celular e esta por sua vez comprime o líquido contido nela. Durante a secagem, ao retirarmos a água estamos diminuindo a tensão que o líquido exerce contra a pare

de celular. A diminuição da tensão, provocará o encolhimento do material (Van Arsdel, 1965).

A quantificação deste fenômeno é importante para podermos analisar a cinética de secagem e consequentemente a totalidade do fenômeno de secagem. Do ponto de vista matemático, o efeito do encolhimento causa mudança nas condições de contorno, para a resolução da 2ª lei de Fick.

Görling (1958) sugere que a taxa inicial de secagem pode não ter a região de taxa constante em certos materiais devido à influência do encolhimento. Consequentemente, mesmo nos primeiros estágios de secagem a taxa de secagem deixa de ser constante.

Para obtermos uma correlação que expresse o fenômeno de encolhimento, o primeiro passo foi a aplicação da analogia de expansão térmica para o encolhimento, isto é, o encolhimento em qualquer dimensão linear resulta numa função linear da umidade.

Kilpatrick e col. (1955) sugerem que durante os primeiros estágios de secagem, o volume do encolhimento é igual ao volume de água removida na secagem, sendo que nos estágios finais o encolhimento é menor que a água removida.

Suzuki e col. (1976) trabalharam com cenoura, batata, batata doce e rabanete, analisando o encolhimento com os três modelos a seguir:

- 19) modelo de secagem uniforme: Supõe-se que o volume encolhido é igual ao volume da água retirada. Como o volume da água corresponde a fração desidratável, relacionando o encolhimento ao ponto de equilíbrio, a equação obtida depende somente da umidade e densidade no equilíbrio.
- 29) modelo de secagem central: Supõe-se que a concentração varia do centro (mais úmido) à superfície (mais seca), relacionando com a isoterma de equilíbrio. Portanto, supõe-se

que a camada seca é separada do núcleo úmido. Considerando ainda que a densidade do centro seja igual a densidade inicial do material, onde a densidade da camada é igual a densidade do material em equilíbrio, obtiveram a equação deste modelo.

- 39) modelo de secagem semi-central: supõe-se que a densidade da camada seca não é igual a densidade do material seco, uma vez que a umidade na fase gasosa contribui menos que a umidade na fase líquida. Nestes casos, a densidade da camada seca situa-se no valor intermediário da densidade inicial com a densidade do material seco.

Lozano e col. (1983), em um estudo de encolhimento, porosidade e densidade, apresentaram o modelo de encolhimento onde relacionam a razão de variação do volume (em relação ao volume inicial) em função da razão do conteúdo de umidade (em relação ao conteúdo inicial de umidade).

Balaban e Pigott (1986), trabalhando com secagem de Sebastes marinus apresentam uma correlação linear de encolhimento, onde a mudança porcentual na dimensão resulta numa função linear da fração volumétrica da água.

Jason (1958), trabalhando com filé de bacalhau apresenta o processo de encolhimento em três dimensões com gráfico onde este encolhimento não é apresentado como uma função linear do conteúdo de umidade.

Misra e Young (1980) consideram o encolhimento linear e analisam a secagem em termos de difusão líquida.

Viollaz e Suarez (1985), assumindo o encolhimento linear e unidirecional, apresentam os resultados de secagem em termos de logaritmo de concentração adimensional em função do número de Fourier, onde o número de Fourier é analisado em termos de espessura inicial e final do material durante a secagem. A conclusão mais importante dos autores é de que a falsa depen

dência do coeficiente de difusão em função de concentração apresenta-se para o experimento de secagem com as umidades iniciais diferentes. Os mesmos sugerem que ao possuir conteúdos baixos de umidade, o material poderá ser tratado como um sólido rígido, oferecendo talvez uma explicação alternativa para o aparecimento do segundo período da taxa decrescente de secagem.

Gabitto e Aguerre (1985) testam três métodos numéricos para a secagem com encolhimento assumindo a variação do volume como sendo linear do conteúdo de umidade e comparando a eficiência relativa de cada método.

MATERIAL E MÉTODOS

Visando utilizar o presente estudo em função da homogeneidade do material pesquisado, adquiriu-se no mercado, parte de um tubarão do tipo Galha preta (Carcharhinus limbatus), congelado em câmaras frigoríficas à temperatura de -37°C , pesando aproximadamente 40 kg. Obteve-se filês nas dimensões aproximadas de 13 cm de comprimento, 6 cm de largura e 2 cm de espessura, mantidos congelados até iniciar o experimento. No momento em que os mesmos entrassem em fase experimental eram descongelados e submetidos a salga mista (Geromel e Forster, 1982), por um período de quatro dias.

Buscando um método para verificar sua variação em volume no decorrer da secagem, experimentou-se técnicas utilizadas em outros materiais, isto é, a técnica consistia na imersão da amostra em um recipiente com o volume do material conhecido, onde pelo deslocamento do volume obtinha-se o volume da amostra. Experimentou-se materiais tais como o "painço" e "sagu", pois estes não interferiam nas medidas de umidade da amostra durante a secagem. No entanto, os valores dos volumes obtidos na amostra com estes materiais não coincidia com as medidas efetuadas, utilizando a água como padrão de determinação.

Em vista dos resultados inadequados utilizou-se "slides" para a determinação dos dados de encolhimento durante a secagem.

Fotografou-se o material em conjunto com uma área padrão referencial. Visando evitar erros provenientes da focalização, ajustou-se a área referencial em relação a largura e espessura da amostra que está sendo fotografada.

Os "slides" assim obtidos são projetados, delineados no papel juntamente com a área referencial e, utilizando-se um planímetro ("compensating polar planimeter"), obtêm-se as áreas frontal e lateral. Através destas áreas obtêm-se as 3 dimensões.

Os filês salgados eram pesados, fotografados e introduzidos em uma câmara de secagem (um duto circular de acrílico transparente de $78,54 \text{ cm}^2$ de área seccional). As velocidades do ar de secagem neste duto eram prefixadas em 0,5 m/s e 3,0 m/s. A câmara de secagem é acoplada a um condicionador de ar utilizando aspersão de água ("Aminco-aire"), munido de controle de umidade relativa, temperatura e velocidade do ar. Trabalhou-se com as seguintes condições de secagem: $30^\circ\text{C} - 30\%$; $20^\circ\text{C} - 40\%$; $30^\circ\text{C} - 45\%$; e $40^\circ\text{C} - 45\%$ de temperatura e umidade relativa.

Visando obter os dados de secagem do filê salgado, efetuou-se os testes preliminares para determinar o tempo de secagem necessário na obtenção do peso final constante. Os testes indicaram a duração de 14 dias e forneceram o intervalo de medidas experimentais para cada teste. Assim, obteve-se os dados experimentais de secagem através de pesagens, com intervalos sugeridos nos testes preliminares. Para tal utilizou-se uma balança semi-analítica ("Mettler com precisão de duas casas decimais em gramas"). A determinação da umidade final é conseguida, através do método de estufa a 105°C em 24 horas.

Recomenda-se todo cuidado na determinação da umidade deste tipo de material uma vez que a obtenção de um material fino e homogêneo garantirá resultados precisos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizando as instalações laboratoriais da área de pescados da Faculdade de Engenharia de Alimentos, obteve-se a composição centesimal média do filê salgado de tubarão utilizado neste experimento (Park e Cornejo, 1987). Os Componentes são: 55,92% de umidade; 0,88% de gordura; 25,67% de proteína; 16,97% de cloreto de sódio; 18,35% de cinzas.

As variações das dimensões (L_1 = Comprimento em cm; L_2 = largura em cm; L_3 = espessura em cm) em função do conteúdo de umidade (X = em g. de água por g. de matéria seca), mostradas nas figuras I-a e I-b.

Os ensaio de secagem foram identificados da seguinte maneira:

corrida (a) corresponde: 30°C; 45% U.R.; 0,5 m/s (ar)

79,95 g. massa seca;

1,301 g H_2O /g.m.s.;

amostra inicial: 12,60 X 7,00 X 1,60 cm.

corrida (b) corresponde: 30°C; 45% U.R.; 3,0 m/s (ar)

123,79 g. massa seca;

1,260 g H_2O /g.m.s.;

amostra inicial: 15,05 X 7,16 X 2,22 cm

corrida (c) corresponde: 30°C; 30% U.R.; 0,5 m/s (ar)

116,02 g. massa seca

1,315 g H_2O /g.m.s.;

amostra inicial: 11,61 X 6,84 X 2,62 cm

corrida (d) corresponde: 30°C; 30% U.R.; 3,0 m/s (ar)

101,71 g. massa seca;

1,416 g H_2O /g.m.s.;

amostra inicial: 11,80 X 6,57 X 2,80 cm

corrida (e) corresponde: 20°C; 40% U.R.; 0,5 m/s; (ar)

139,71 g. massa seca;

1,304 g H₂O/g.m.s.;

amostra inicial: 15,42 X 6,70 X 2,79 cm

corrida (f) corresponde: 20°C; 40% U.R.; 3,0 m/s (ar)

150,88 g. massa seca;

1,183 g H₂O/g.m.s.;

amostra inicial: 15,42 X 6,48 X 2,62 cm

corrida (g) corresponde: 40°C; 45% U.R.; 0,5 m/s (ar)

120,32 g. massa seca;

1,332 g H₂O/g.m.s.;

amostra inicial: 11,56 X 6,39 X 3,37 cm

corrida (h) corresponde: 40°C; 45% U.R.; 3,0 m/s; (ar)

125,59 g. massa seca;

1,333 g H₂O/g.m.s.;

amostra inicial: 11,42 X 7,40 X 3,10 cm

Os dados de secagem encontram-se na tabela I e figura II.

Visando verificar a influência do encolhimento na difusividade, utilizou-se as seguintes equações sugeridas por Sherwood (1929a):

i) Considerando que não existe encolhimento.

$$RE = \frac{\bar{X} - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{-D(2n+1)^2 \pi^2 \theta}{4a^2} \right] \quad [1]$$

onde: $\bar{X}$ é o conteúdo de umidade média da amostra em g. de água por g. de massa seca.

X_e é o conteúdo de umidade em equilíbrio em g. de água por g. de massa seca. No presente estudo, assumiu-se como sendo o menor valor obtido para cada binômio: temperatura e umidade relativa.

X_0 é o conteúdo de umidade inicial em g. de água por g. de massa seca.

D é a difusividade de transferência de massa nas unidades coerentes dos termos da equação.

a é a semiespessura em cm.

θ é o tempo em hora.

ii) Considerando que existe encolhimento.

$$WE = \frac{\bar{Y} - Y_e}{Y_0 - Y_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{D(2n+1)^2 \pi^2 \theta}{4a^2} \right] \quad [2]$$

onde: Y é o conteúdo de umidade por volume por massa seca, isto é, (X/V) em g. de água por g. de massa seca por cm^3 . O volume em função do conteúdo de umidade é obtido através de $L_1 \times L_2 \times L_3$ das figuras I-a e I-b.

Outros termos estão definidos na equação [1].

Utilizando o método de Gauss-Newton do programa estatístico SAS da Unicamp, obteve-se os referidos resultados.

Com a utilização da equação [1], obteve-se os valores de $DRE = (D/4 a^2)$ e com a utilização de equação [2], obteve-se os valores de $DWE = (D/4 a^2)$, conforme tabelas II e III. Visando permitir a melhor observação do ajuste destas equações nos dados experimentais, as figuras III a XVIII mostram os dados experimentais e calculados utilizando 20 termos da série destas equações.

Conforme estas tabelas e figuras, podemos notar que não há necessidade da utilização de mais de 5 termos destas equações, no entanto, utilizaremos os resultados obtidos com 20 termos para prosseguir a análise.

Com os dados das tabelas II e III, obteve-se as difusividades, conforme tabelas IV e V.

Os resultados contidos nas tabelas IV e V, mostram a influência do encolhimento na difusividade, demonstrando que as

difusividades efetivas quando calculadas sem a devida consideração do fenômeno de encolhimento, superestima a transferência de massa por difusão, trazendo inclusive erros na avaliação da resistência de transferência de massa no material (resistência interna), para outros tipos de análise na secagem.

A discrepância apresentada nas difusividades das corridas (a) e (b) em relação às corridas (c) e (d), apesar do ar de secagem estar na mesma temperatura, pode ser explicada da seguinte forma: As vazões do ar utilizadas nestes experimentos foram de $39,27 \text{ cm}^3/\text{s}$ e $235,62 \text{ cm}^3/\text{s}$ para as amostras (a) e (c)

(b) e (d), respectivamente. A área livre para o escoamento do ar é a área do duto menos a área da amostra, isto é, as velocidades do ar de secagem para as corridas (a) e (b) foram menores que as velocidades do ar para as corridas (c) e (d), uma vez que as espessuras das amostras das corridas (a) e (b) são menores que as amostras das corridas (c) e (d). E ainda, aliando o fato da umidade relativa do ar de secagem para as corridas (a) e (b) ser maior do que a umidade relativa para as corridas (c) e (d), indicam a contribuição da relação da resistência externa versus resistência interna, conforme sugerido por Sherwood (1929a).

Os valores das difusividades efetivas das corridas (c) e (d) de diferentes velocidades do ar não apresentaram diferenças que possam demonstrar a melhoria na transferência de massa com o aumento de velocidade do ar (resistência externa), e ainda para as corridas (e) e (f), (g) e (h) chegam a demonstrar a diminuição da transferência de massa com o aumento de velocidade

Este comportamento deverá ser melhor estudado através não só da contribuição de número de Biot, mas também de um possível fenômeno de endurecimento superficial.

Em relação aos resultados mostrados na tabela V, os valores mais corretos, de difusividade efetiva considerando o fenômeno de encolhimento, são os valores calculados para a espes

sura média, uma vez que a variação da espessura (ou semiespes-sura) durante a secagem resulta numa função linear do conteúdo de umidade.

Utilizando os valores médios das difusividades das corridas experimentais de: (c) e (d); (e) e (f); (g) e (h) das tabelas IV e V, calculou-se a energia de ativação através da equação do tipo Arrhenius, isto é:

$$D = A \exp (-E_a/RT)$$

3

onde: E_a é a energia de ativação

R é o constante universal de gases

T é a temperatura absoluta

As energias de ativação assim calculadas são: 1.063,6 cal/mol para as difusividades sem encolhimento, 1.011,0 cal/mol para as difusividades baseada na espessura inicial com encolhimento, 1.113,9 cal/mol para as difusividades baseadas na espessura média com encolhimento e 1.248,9 cal/mol para as difusividades baseadas na espessura final com encolhimento.

Com a mesma explicação utilizada para a difusividade efetiva, a energia de ativação mais correta é aquela baseada na espessura média.

Conforme descrito na revisão bibliográfica, os resultados deste trabalho mostram que a utilização da 2ª lei de Fick é excelente para ajustar as curvas de secagem, independente da consideração do encolhimento ou não no processo.

O presente estudo indica a necessidade de estudos complementares para que se possa aprofundar a análise do fenômeno enfocado.

CONCLUSÕES

A utilização da 2ª lei de Fick para a secagem de filé salgado de tubarão apresenta excelente ajuste dos dados experimentais, considerando ou não a contribuição do fenômeno de encolhimento. Além disso, indicando a não existência de um período de taxa constante de secagem.

A difusividade efetiva calculada pela utilização da 2ª lei de Fick, supondo que as dimensões originais não se alteram durante a secagem é maior que a difusividade efetiva calculada considerando o encolhimento.

O presente estudo indica a necessidade da avaliação da resistência externa para permitir o estudo da contribuição das resistências externa e interna no processo de secagem.

Para o dimensionamento, é suficiente analisar a secagem utilizando a 2ª lei de Fick, pelo seu ajuste de dados experimentais.

TABELA I - Dados experimentais de secagem

Corrida a		Corrida b		Corrida c		Corrida d	
TEMPO (h)	UMIDADE (g H ₂ O/g ms)	TEMPO (h)	UMIDADE (g H ₂ O/g ms)	TEMPO (h)	UMIDADE (g H ₂ O/g ms)	TEMPO (h)	UMIDADE (g H ₂ O/g ms)
0	1.3005	0	1.2595	0	1.3150	0	1.4159
2	1.2126	2	1.1547	2	1.2076	2	1.2752
4	1.1437	4	1.1092	4	0.0000	4	0.0000
6	1.0863	6	1.0706	6	1.1051	6	1.1712
8	1.0391	8	1.0416	8	1.0699	8	1.1316
10	1.0026	10	1.0151	10	1.0303	10	1.0837
12	0.9652	12	0.9902	12	1.0074	12	1.0636
14	0.9373	14	0.9699	14	0.9794	14	1.0334
16	0.9093	16	0.9505	16	0.9544	16	1.0053
18	0.8826	18	0.9310	19	0.9224	19	0.9707
20	0.8580	20	0.9129	20	0.9113	20	0.9536
24	0.8136	24	0.8797	24	0.8738	24	0.9168
28	0.7727	28	0.8485	28	0.8384	28	0.8739
32	0.7350	32	0.8176	32	0.8073	32	0.8462
36	0.6989	36	0.7851	36	0.7766	36	0.8112
40	0.6700	40	0.7642	40	0.7504	40	0.7823
44	0.6409	44	0.7392	42	0.7382	42	0.7632
48	0.6162	48	0.7166	46	0.7093	46	0.7377
52	0.5911	52	0.6938	50	0.6893	50	0.7170
56	0.5693	56	0.6741	54	0.6667	54	0.6931
60	0.5474	60	0.6548	58	0.6452	58	0.6709
68	0.5076	68	0.6187	62	0.6238	62	0.6462
76	0.4752	76	0.5898	69	0.5910	69	0.6151
80	0.4590	80	0.5739	74	0.5632	74	0.5929
101	0.4221	101	0.5119	80	0.5311	80	0.5743
175	0.2834	175	0.3034	86	0.5232	86	0.5478
191	0.2620	191	0.3546	93	0.5025	93	0.5243
199	0.2529	199	0.3431	98	0.4832	98	0.5065
214	0.2355	214	0.3214	104	0.4647	104	0.4877
230	0.2271	230	0.3098	110	0.4457	110	0.4632
238	0.2150	238	0.2925	119	0.4209	119	0.4436
247	0.2098	247	0.2837	126	0.4020	126	0.4237
262	0.2006	262	0.2681	134	0.3824	134	0.4046
272	0.1963	272	0.2609	143	0.3626	143	0.3842
278	0.1916	278	0.2547	150	0.3468	150	0.3677
286	0.1882	286	0.2484	158	0.3311	158	0.3518
295	0.1848	295	0.2418	166	0.3156	166	0.3358
314	0.1782	314	0.2291	174	0.3023	174	0.3227
326	0.1754	326	0.2220	181	0.2908	181	0.3112
334	0.1731	334	0.2165	190	0.2736	190	0.2975
335	0.1728	335	0.2165	198	0.2659	198	0.2872
				214	0.2440	214	0.2663
				231	0.2236	231	0.2471
				238	0.2156	238	0.2402
				246	0.2074	246	0.2221
				254	0.2000	254	0.2259
				267	0.1879	267	0.2150
				293	0.1673	293	0.1966
				312	0.1540	312	0.1845
				335	0.1410	335	0.1744

TABELA I - (Continuação)

Corrida e		Corrida f		Corrida g		Corrida h	
TEMPO (h)	UMIDADE (g. H ₂ O/g.ms)	TEMPO (h)	UMIDADE (g. H ₂ O/g.ms)	TEMPO (h)	UMIDADE (g. H ₂ O/g.ms)	TEMPO (h)	UMIDADE (g. H ₂ O/g.ms)
0	1.3035	0	1.1827	0	1.3317	0	1.3239
2	1.2170	2	1.1002	2	1.2385	2	1.1990
4	1.1803	4	1.0714	4	1.1737	4	1.1465
6	1.1392	6	1.0413	6	1.1274	6	1.1084
8	1.1137	8	1.0211	8	1.0972	8	1.0813
10	1.0906	10	1.0039	11	1.0535	11	1.0414
12	1.0679	12	0.9854	12	1.0398	12	1.0278
14	1.0490	14	0.9699	14	1.0162	14	1.0042
16	1.0304	16	0.9545	16	0.9956	16	0.9839
18	1.0098	18	0.9381	18	0.9783	18	0.9675
20	0.9959	20	0.9259	20	0.9590	20	0.9482
22	0.9706	22	0.9046	22	0.9394	22	0.9301
24	0.9575	24	0.8932	26	0.9086	26	0.9089
30	0.9169	30	0.8585	30	0.8812	30	0.8720
34	0.8964	34	0.8408	34	0.8507	34	0.8403
38	0.8738	38	0.8210	38	0.8258	38	0.8171
43	0.8509	43	0.8009	42	0.8038	42	0.7922
46	0.8338	46	0.7859	47	0.7782	47	0.7616
50	0.8166	50	0.7708	50	0.7618	50	0.7448
54	0.7972	54	0.7535	54	0.7422	54	0.7224
58	0.7801	58	0.7382	58	0.7223	58	0.6986
65	0.7519	65	0.7121	62	0.7064	62	0.6727
70	0.7308	70	0.6933	66	0.6866	66	0.6542
74	0.7157	74	0.6804	70	0.6702	70	0.6345
80	0.6922	80	0.6582	76	0.6433	76	0.6025
89	0.6613	89	0.6303	78	0.6401	78	0.5912
95	0.6515	95	0.6214	79	0.6360	79	0.5939
101	0.6334	101	0.6047	97	0.6313	97	0.5837
116	0.5841	116	0.5605	104	0.5810	104	0.5309
123	0.5689	123	0.5469	120	0.5072	120	0.4851
131	0.5480	131	0.5288	130	0.4994	130	0.4217
140	0.5260	140	0.5094	151	0.4171	151	0.3643
142	0.5213	142	0.5053	170	0.3700	170	0.2641
148	0.5087	148	0.4946	194	0.3241	194	0.2757
155	0.4964	155	0.4837	215	0.2913	215	0.2453
163	0.4784	163	0.4679	222	0.2810	222	0.2362
171	0.4643	171	0.4557	241	0.2757	241	0.2359
179	0.4498	179	0.4430	248	0.2647	248	0.2225
187	0.4356	187	0.4305	270	0.2403	270	0.2021
195	0.4224	195	0.4194	279	0.2328	279	0.1956
203	0.4103	203	0.4089	296	0.2132	296	0.1843
212	0.3966	212	0.3975	317	0.2063	317	0.1740
219	0.3868	219	0.3892	335	0.1952	335	0.1649
227	0.3751	227	0.3792	345	0.1906	345	0.1610
235	0.3641	235	0.3698	358	0.1870	358	0.1589
244	0.3535	244	0.3610				
251	0.3457	251	0.3541				
259	0.3361	259	0.3466				
267	0.3288	267	0.3396				
275	0.3205	275	0.3326				
283	0.3125	283	0.3256				
291	0.3051	291	0.3185				
299	0.2974	299	0.3118				
315	0.2836	315	0.2993				
323	0.3419	323	0.2940				
332	0.2697	332	0.2871				

TABELA II - Os valores calculados de $D/4a^2$ (em h^4), utilizando 1, 3, 5 e 20 termos da eq. (1) .

DRE 1 (a)	0,0014392756	$\pm$	0,00005609398
DRE 3 (a)	0,0014621728	$\pm$	0,00002449217
DRE 5 (a)	0,0014620570	$\pm$	0,00002158944
DRE 20 (a)	0,0014620269	$\pm$	0,00002013671
DRE 1 (b)	0,0009212202	$\pm$	0,00003329171
DRE 3 (b)	0,0009462950	$\pm$	0,00001548830
DRE 5 (b)	0,0009467721	$\pm$	0,00001394427
DRE 20 (b)	0,0009468045	$\pm$	0,00001308262
DRE 1 (c)	0,0010815517	$\pm$	0,00009577176
DRE 3 (c)	0,0011134220	$\pm$	0,00010137145
DRE 5 (c)	0,0011160856	$\pm$	0,00010166179
DRE 20 (c)	0,0011161825	$\pm$	0,00010158782
DRE 1 (d)	0,0011004921	$\pm$	0,00009665938
DRE 3 (d)	0,0011365332	$\pm$	0,00010319827
DRE 5 (d)	0,0011393674	$\pm$	0,00010351043
DRE 20 (d)	0,0011394763	$\pm$	0,00010343613
DRE 1 (e)	0,0008748014	$\pm$	0,00002178490
DRE 3 (e)	0,0008856715	$\pm$	0,00000934299
DRE 5 (e)	0,0008858309	$\pm$	0,00000832724
DRE 20 (e)	0,0008858373	$\pm$	0,00000780680
DRE 1 (f)	0,0008188044	$\pm$	0,00001991928
DRE 3 (f)	0,0008286410	$\pm$	0,00000741832
DRE 5 (f)	0,0008288404	$\pm$	0,00000637749
DRE 20 (f)	0,0008288578	$\pm$	0,00000579905
DRE 1 (g)	0,0008787224	$\pm$	0,00002645404
DRE 3 (g)	0,0008978556	$\pm$	0,00001216306
DRE 5 (g)	0,0008981545	$\pm$	0,00001081602
DRE 20 (g)	0,0008981609	$\pm$	0,00001010196
DRE 1 (h)	0,0010033429	$\pm$	0,00002861814
DRE 3 (h)	0,0010221474	$\pm$	0,00001438916
DRE 5 (h)	0,0010226154	$\pm$	0,00001319883
DRE 20 (h)	0,0010226552	$\pm$	0,00001246127

TABELA III - Os valores calculados de $D/4a^2$ (em h^{-1}), utilizando 1, 3, 5 e 20 termos da eq. [2].

DWE 1 (a)	0,0009940284	±	0,00005010926
DWE 3 (a)	0,0010037114	±	0,00002500593
DWE 5 (a)	0,0010034365	±	0,00002344942
DWE 20 (a)	0,0010033768	±	0,00002283583
DWE 1 (b)	0,0006352039	±	0,00003086141
DWE 3 (b)	0,0006435342	±	0,00001367307
DWE 5 (b)	0,0006435665	±	0,00001265408
DWE 20 (b)	0,0006435536	±	0,00001225007
DWE 1 (c)	0,0008843181	±	0,00008140294
DWE 3 (c)	0,0009052933	±	0,00008480500
DWE 5 (c)	0,0009078501	±	0,00008515774
DWE 20 (c)	0,0009080139	±	0,00008511396
DWE 1 (d)	0,0008179353	±	0,00007503070
DWE 3 (d)	0,0008379302	±	0,00007829665
DWE 5 (d)	0,0008405403	±	0,00007868286
DWE 20 (d)	0,0008407524	-	0,00007865167
DWE 1 (e)	0,0006689691	±	0,00002574673
DWE 3 (e)	0,0006726151	±	0,00001663729
DWE 5 (e)	0,0006725890	±	0,00001623196
DWE 20 (e)	0,0006725745	±	0,00001608335
DWE 1 (f)	0,0006174877	±	0,00002426899
DWE 3 (f)	0,0006204391	±	0,00001541592
DWE 5 (f)	0,0006204241	±	0,00001504633
DWE 20 (f)	0,0006204159	-	0,00001491219
DWE 1 (g)	0,0006480383	±	0,00002854336
DWE 3 (g)	0,0006569821	±	0,00001549389
DWE 5 (g)	0,0006570548	±	0,00001477522
DWE 20 (g)	0,0006570383	±	0,00001448916
DWE 1 (h)	0,0007518329	±	0,00003527765
DWE 3 (h)	0,0007595292	±	0,00002292857
DWE 5 (h)	0,0007596745	±	0,00002238917
DWE 20 (h)	0,0007596850	±	0,00002215107

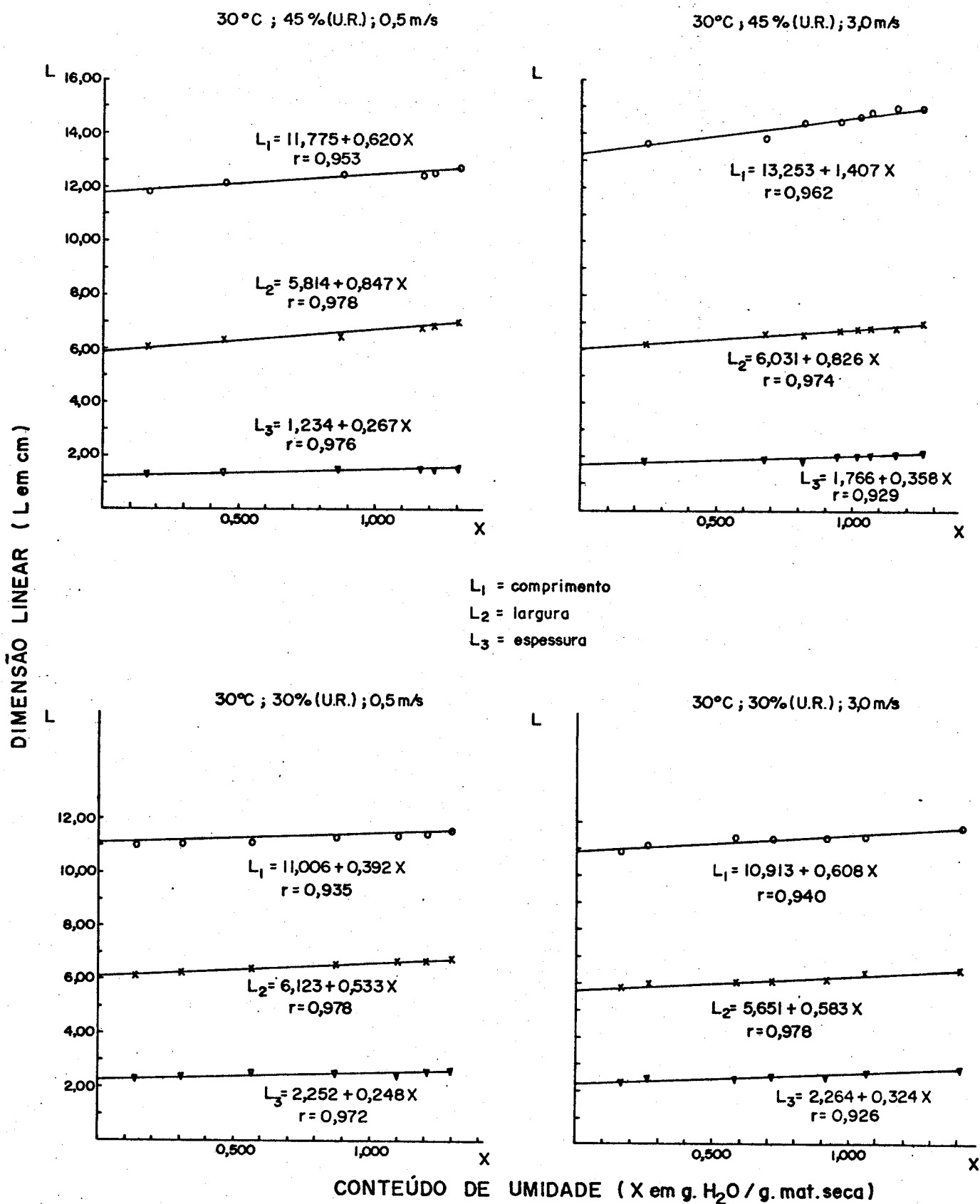
TABELA IV - Dados sobre difusividade, considerando que não existe encolhimento.

CORRIDA EXP.	DIFUSIVIDADE (10^{+7} cm ² /s)	CORRIDA EXP.	DIFUSIVIDADE (10^{+7} cm ² /s)
a	10,40 $\pm$ 0,1	e	19,15 $\pm$ 0,17
b	12,96 $\pm$ 0,18	f	15,80 $\pm$ 0,11
c	21,28 $\pm$ 1,94	g	28,33 $\pm$ 0,32
d	24,82 $\pm$ 2,25	h	27,30 $\pm$ 0,33

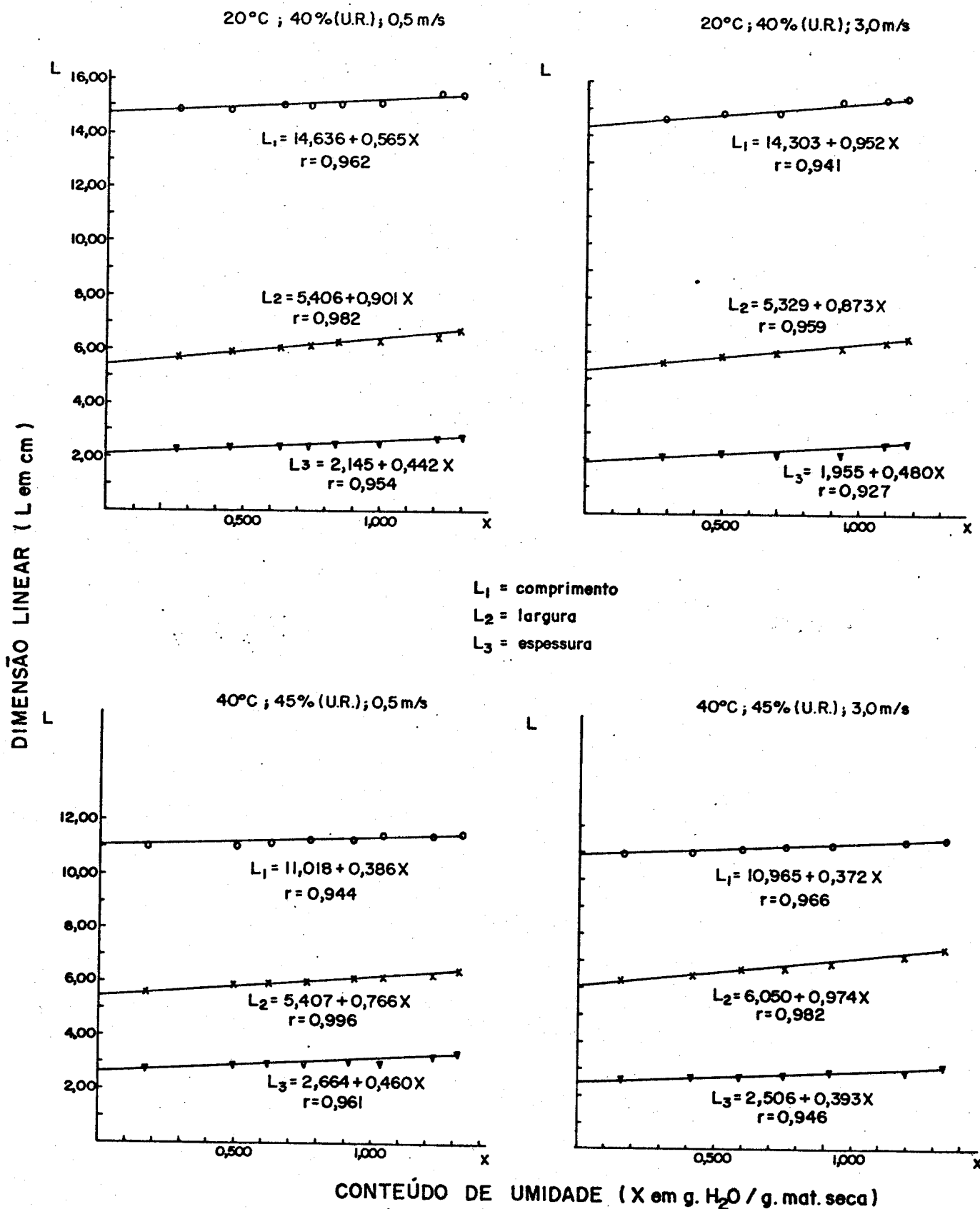
TABELA V - Dados sobre difusividade, considerando encolhimento.

CORRIDA EXP.	DIFUSIVIDADE (10^{+7} cm ² /s) baseado na espessura inicial	DIFUSIVIDADE (10^{+7} cm ² /s) baseado na espessura média	DIFUSIVIDADE (10^{+7} cm ² /s) baseado na espessura final
a	7,14 $\pm$ 0,16	5,60 $\pm$ 0,13	4,24 $\pm$ 0,10
b	8,31 $\pm$ 0,17	7,10 $\pm$ 0,14	5,58 $\pm$ 0,11
c	17,31 $\pm$ 1,62	14,97 $\pm$ 1,40	12,79 $\pm$ 1,20
d	18,31 $\pm$ 1,71	14,97 $\pm$ 1,40	11,97 $\pm$ 1,12
e	14,54 $\pm$ 0,35	11,38 $\pm$ 0,27	8,60 $\pm$ 0,21
f	11,83 $\pm$ 0,28	9,02 $\pm$ 0,22	6,59 $\pm$ 0,16
g	20,73 $\pm$ 0,46	16,61 $\pm$ 0,37	12,95 $\pm$ 0,29
h	20,28 $\pm$ 0,59	16,58 $\pm$ 0,48	13,25 $\pm$ 0,39

As espessuras são calculadas pelas equações da fig.1



— fig. Ia—



L_1 = comprimento
 L_2 = largura
 L_3 = espessura

— fig. Ib —

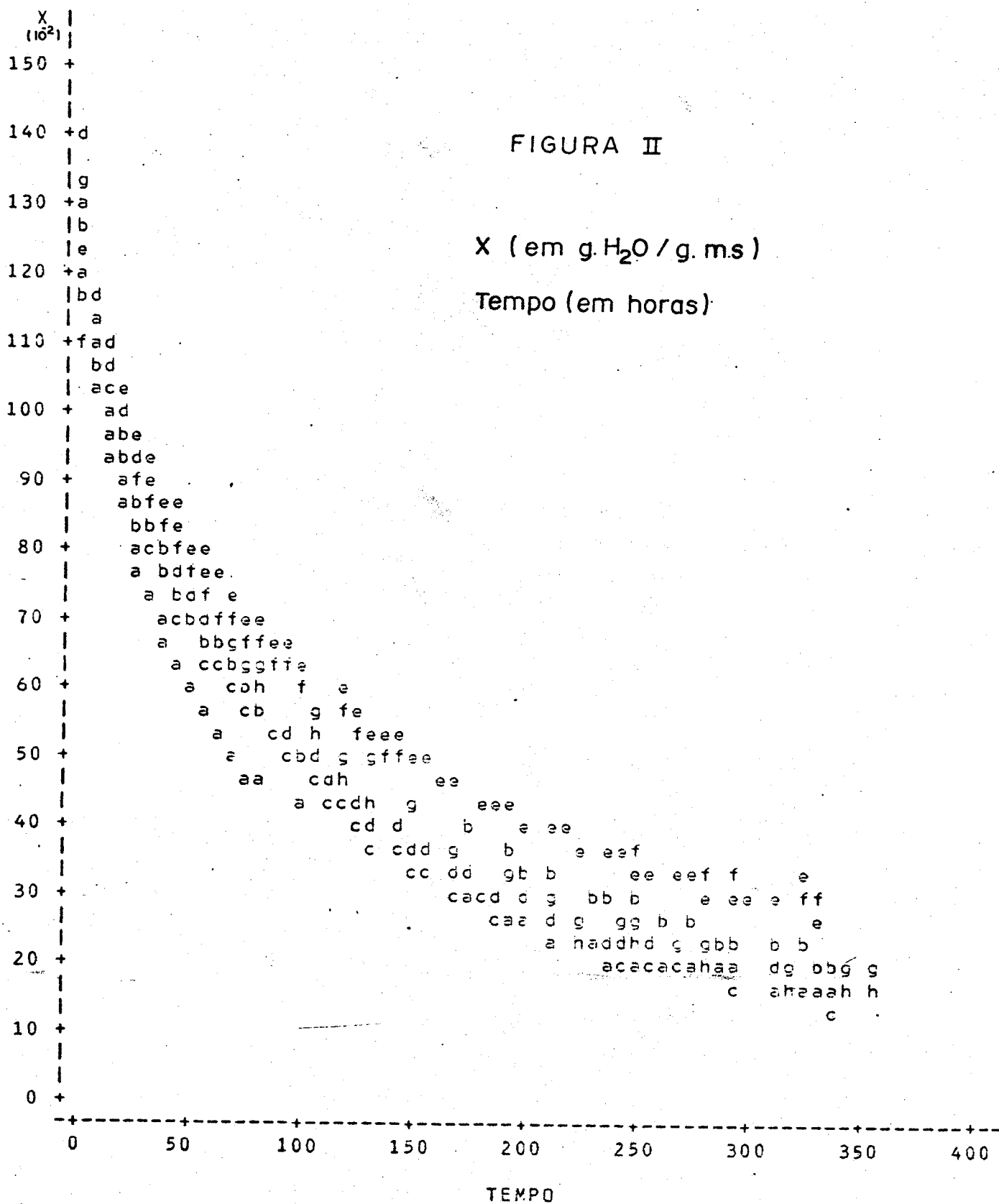
PLOT OF X*TEMPO

SYMBOL IS VALUE OF CORRIDA

FIGURA II

X (em g.H₂O / g.ms)

Tempo (em horas)



NOTE: 163 OBS HIDDEN

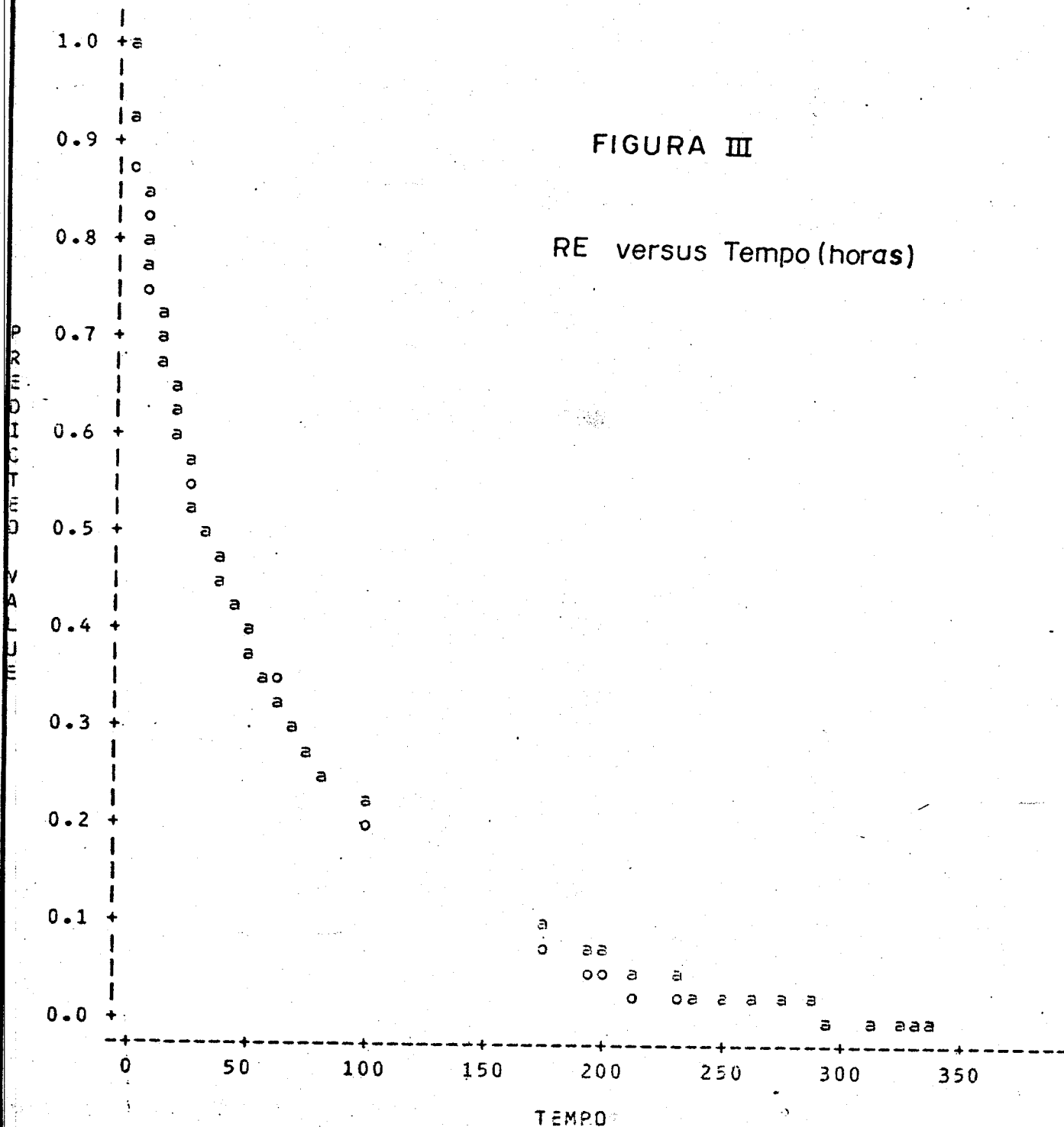
Re20.SAS
 SERIE DE FOURIER APLICADA A PLACA COM 20 TERMOS
 Dados Re*t, onde $D1 = C/4*(a**2)$, $n=19$

21:42 FRIDAY, MAY 1, 1987

CORRIDA=a

PLOT OF RE*TEMPO
 PLOT OF PRE*TEMPO

SYMBOL IS VALUE OF CORRIDA
 SYMBOL USED IS o



Re20.SAS
 SERIE DE FOURIER APLICADA A PLACA COM 20 TERMOS
 Dados Re*t, onde $D1=C/4*(a**2)$, n=19

21:42 FRIDAY, MAY 1, 1987

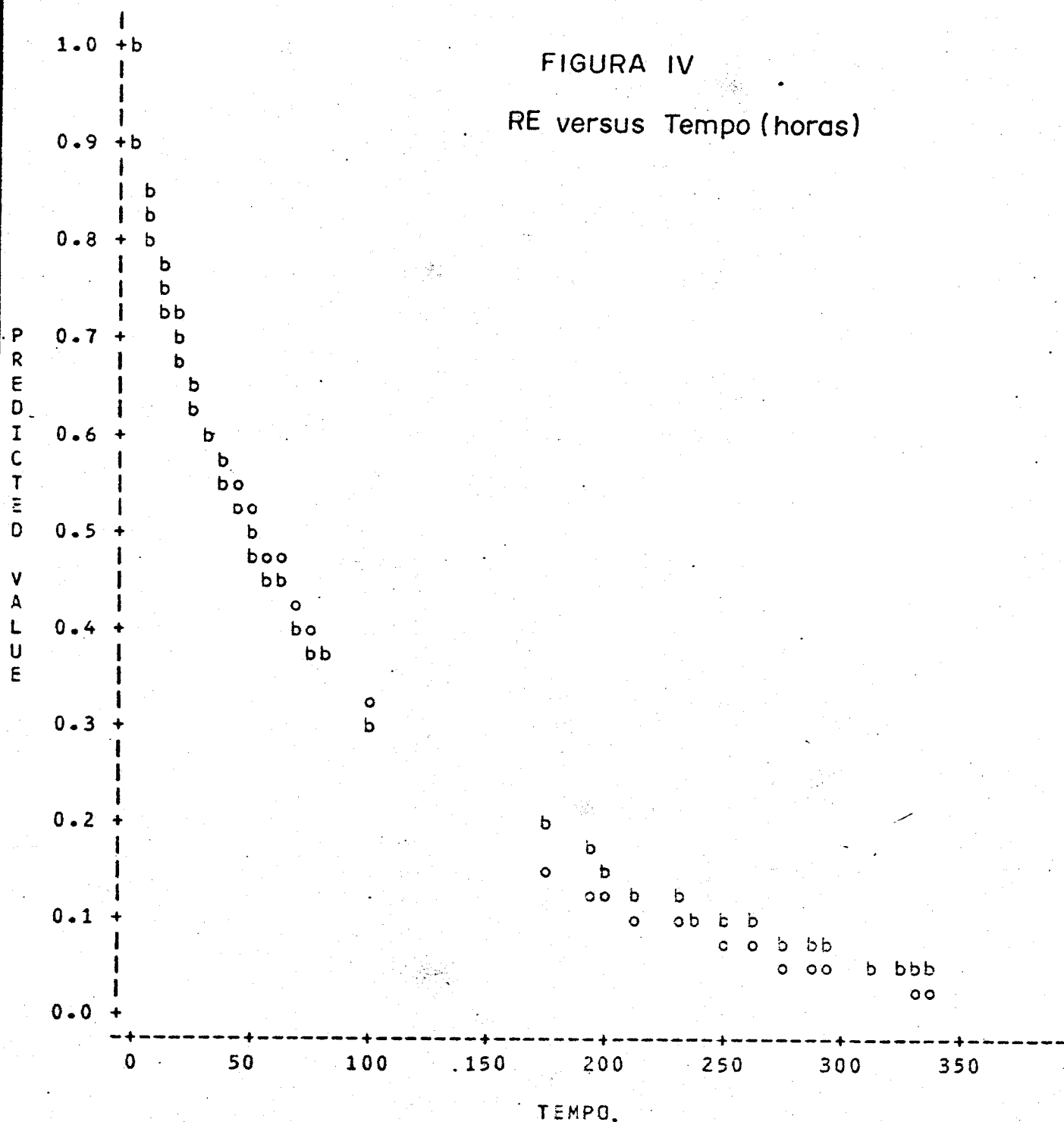
CORRIDA=b

PLOT OF RE*TEMPO
 PLOT OF PRE*TEMPO

SYMBOL IS VALUE OF CORRIDA
 SYMBOL USED IS o

FIGURA IV

RE versus Tempo (horas)



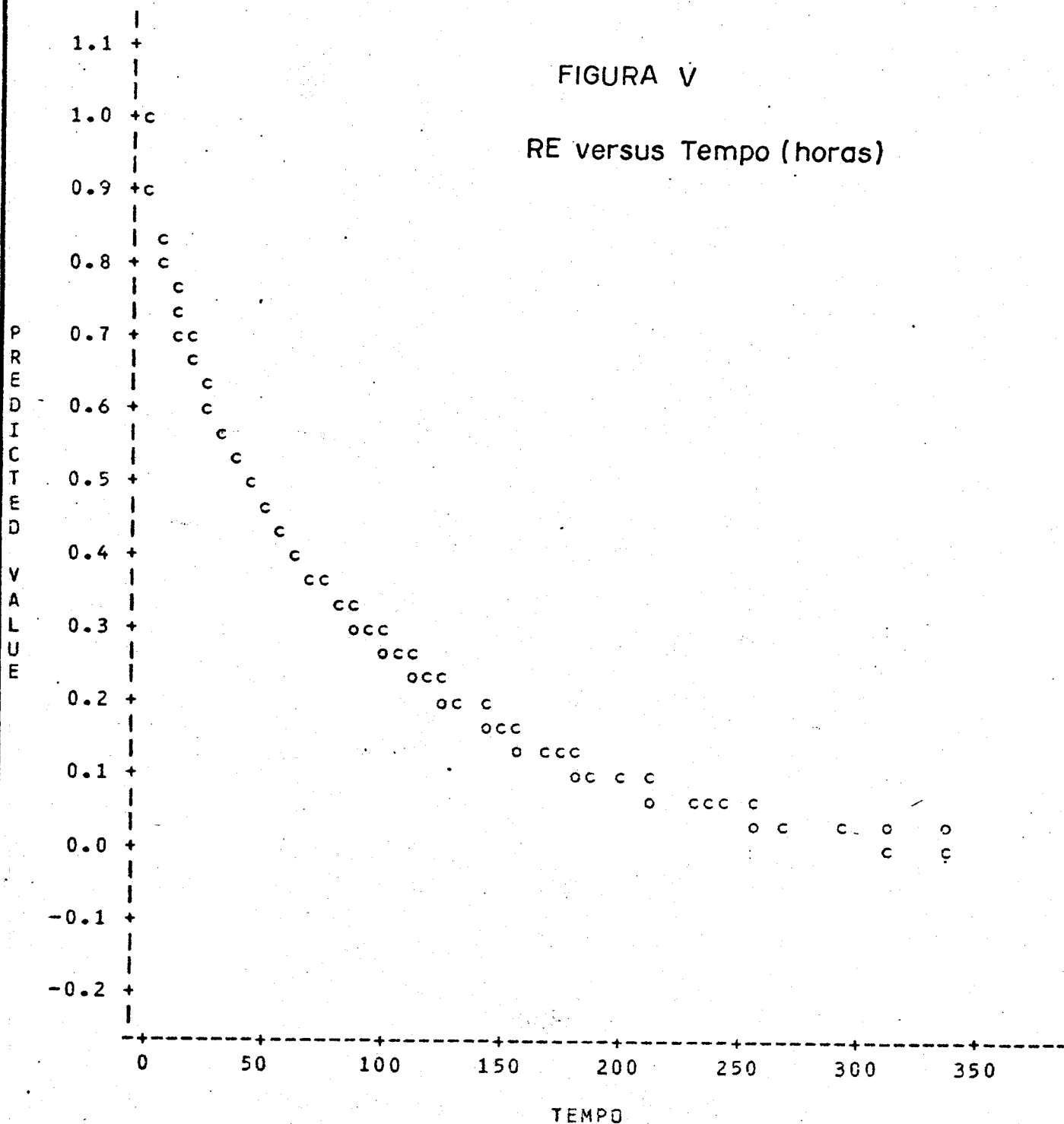
Re20.SAS
SERIE DE FOURIER APLICADA A PLACA COM 20 TERMOS
Dados Re*t, onde $D1=D/4*(a**2)$, n=19

21:42 FRIDAY, MAY 1, 1987

CORRIDA=c

PLOT OF RE*TEMPO
PLOT OF PRE*TEMPO

SYMBOL IS VALUE OF CORRIDA
SYMBOL USED IS o



Re20.SAS
 SERIE DE FOURIER APLICADA A PLACA COM 20 TERMOS
 Dados $Re \times t$, onde $D1 = D/4 \times (a \times 2)$, $n=19$

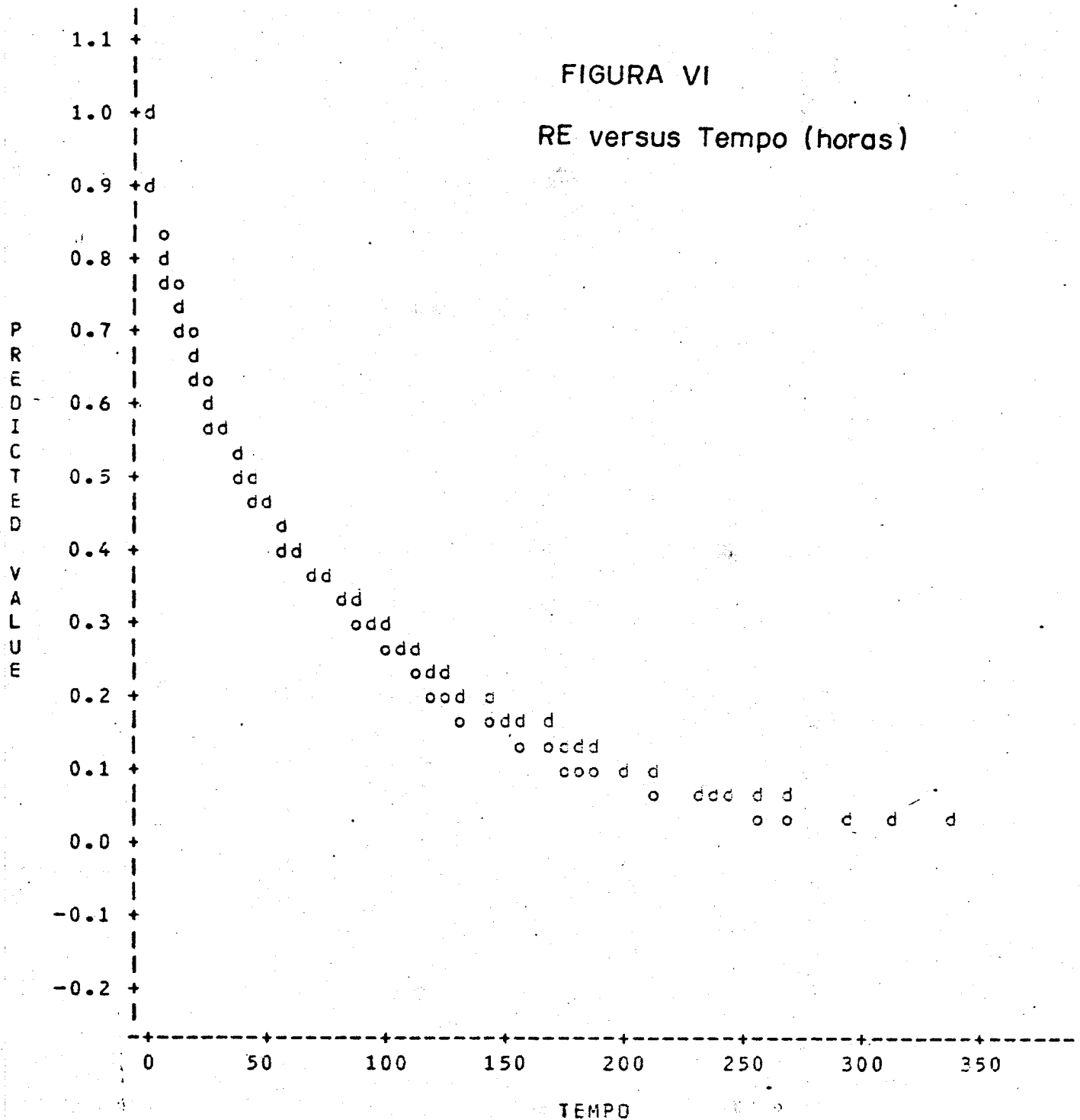
21:42 FRIDAY, MAY 1, 1987

CORRIDA=d

PLOT OF RE*TEMPO SYMBOL IS VALUE OF CORRIDA
 PLOT OF PRE*TEMPO SYMBOL USED IS c

FIGURA VI

RE versus Tempo (horas)



Re20.SAS
 SERIE DE FOURIER APLICADA A PLACA COM 20 TERMOS
 Dados $Re \sim t$, onde $D1 = D/4 \cdot (a \cdot a^2)$, $n=19$

21:42 FRIDAY, MAY 1, 1987

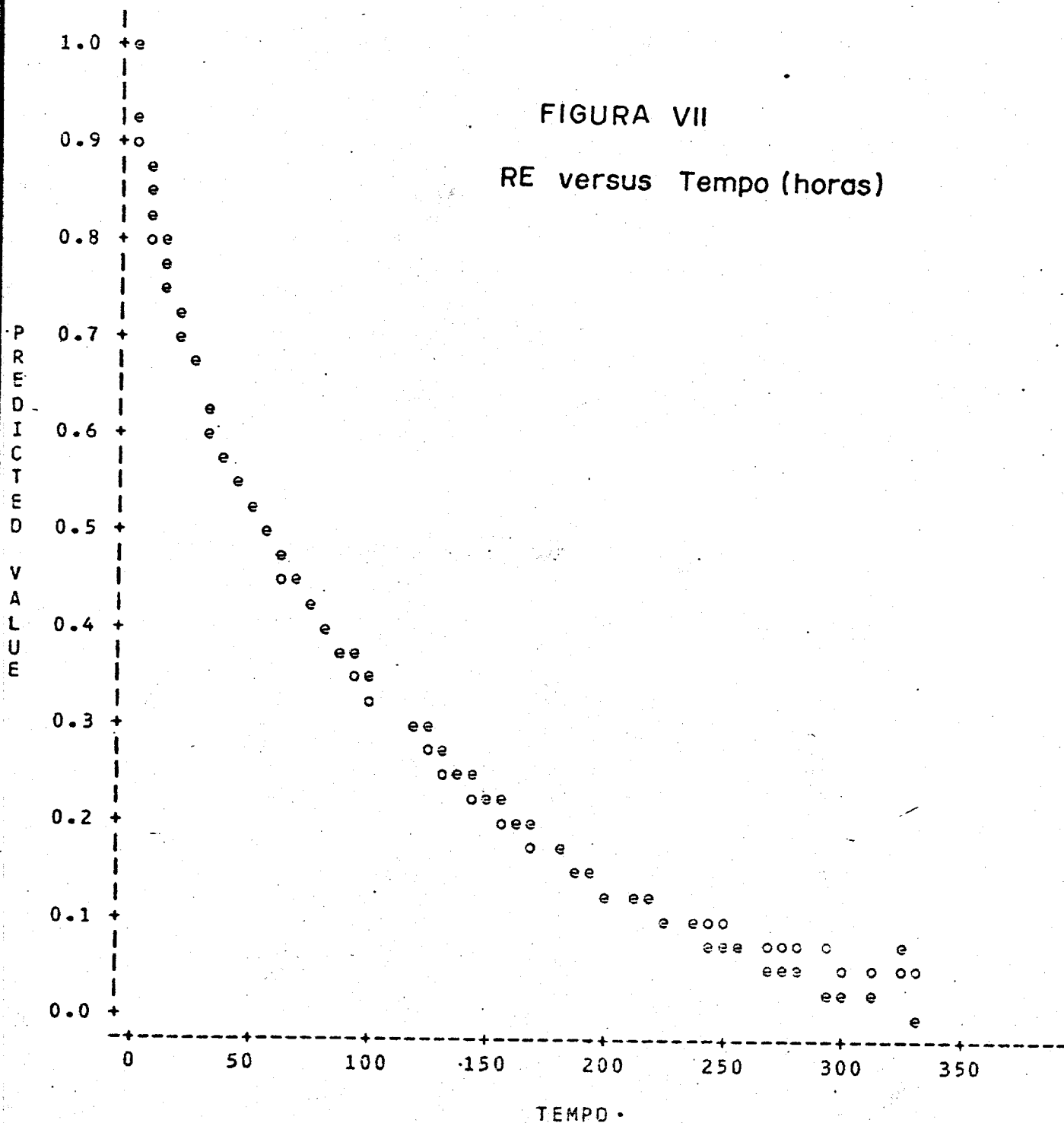
CORRIDA=e

PLOT OF RE*TEMPO
 PLOT OF PRE*TEMPO

SYMBOL IS VALUE OF CORRIDA
 SYMBOL USED IS o

FIGURA VII

RE versus Tempo (horas)



Re20.SAS
 SERIE DE FOURIER APLICADA A PLACA COM 20 TERMOS
 Dados Re*t, onde $D1=L/4*(a**2)$, n=19

21:42 FRIDAY, MAY 1, 1987

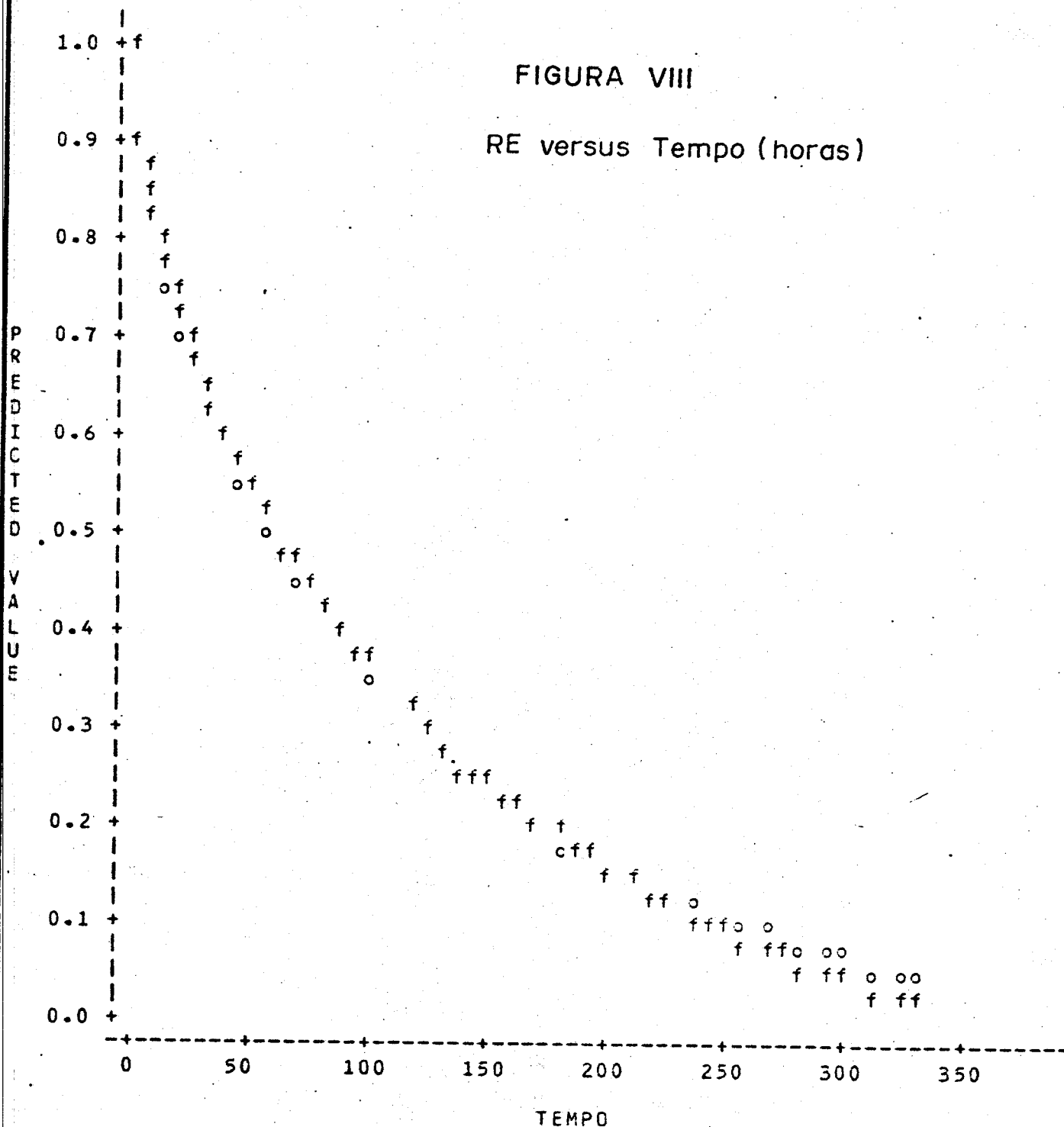
CORRIDA=f

PLOT OF RE*TEMPO
 PLOT OF PRE*TEMPO

SYMBOL IS VALUE OF CORRIDA
 SYMBOL USED IS o

FIGURA VIII

RE versus Tempo (horas)



Re20.SAS
 SERIE DE FOURIER APLICADA A PLACA COM 20 TERMOS
 Dados Re*t, onde $D1=D/4*(a**2)$, n=19

21:42 FRIDAY, MAY 1, 1987

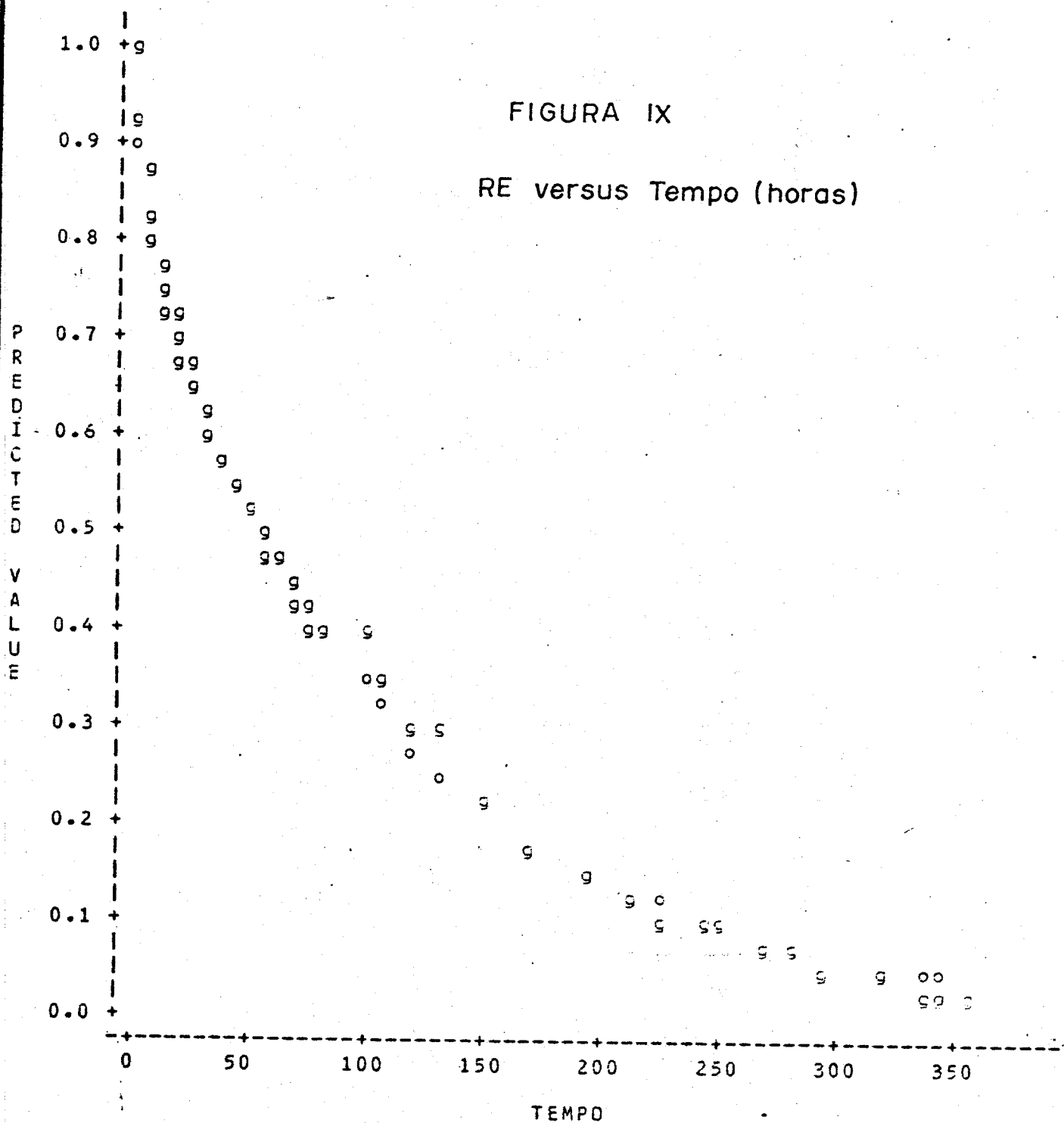
CORRIDA=g

PLOT OF RE*TEMPO
 PLOT OF PRE*TEMPO

SYMBOL IS VALUE OF CORRIDA
 SYMBOL USED IS o

FIGURA IX

RE versus Tempo (horas)



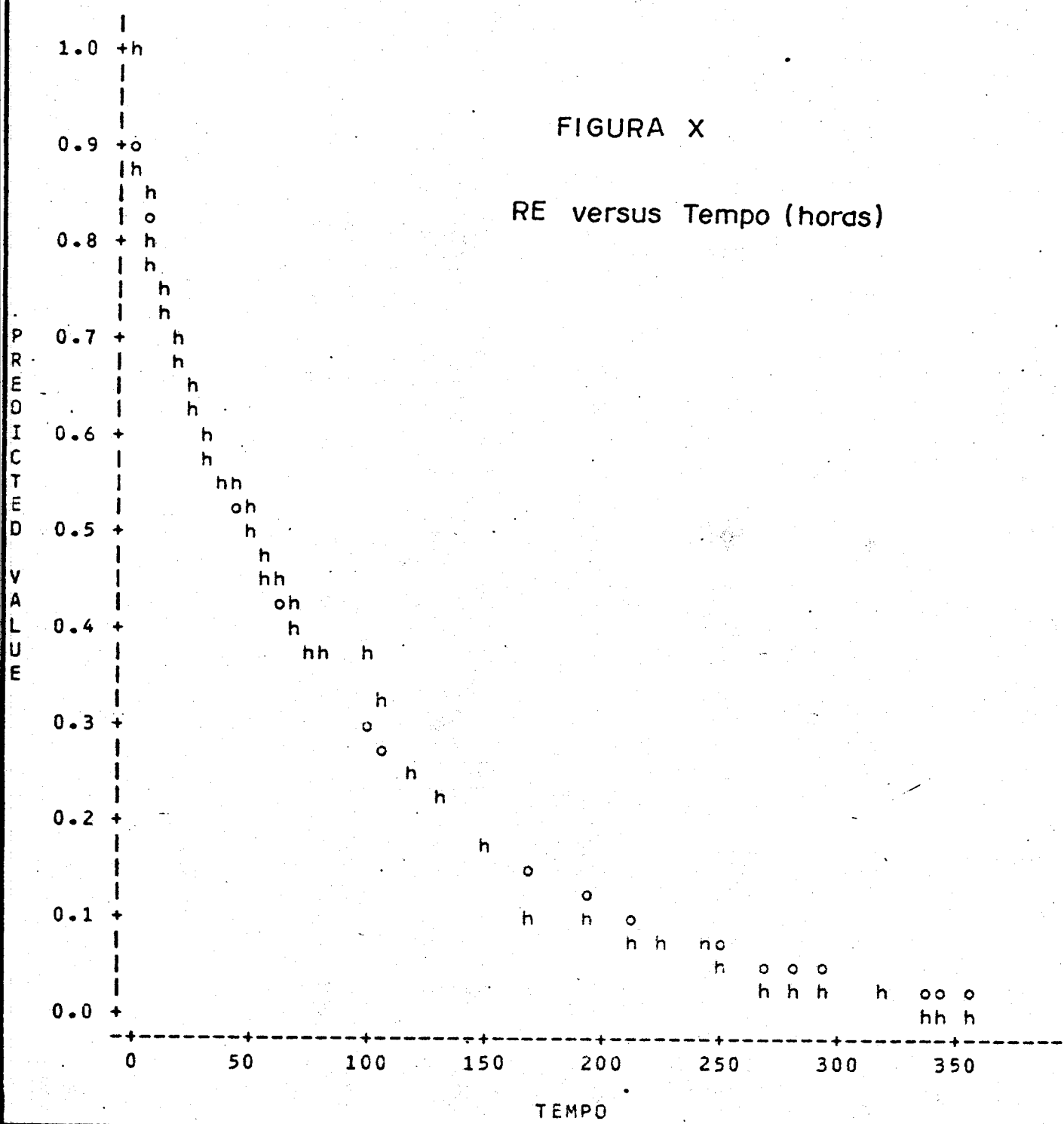
Re20.SAS
SERIE DE FOURIER APLICADA A PLACA COM 20 TERMOS
Dados Re*t, onde $D1=D/4*(a**2)$, n=19

21:42 FRIDAY, MAY 1, 1987

CORRIDA=h

PLOT OF RE*TEMPO
PLOT OF PRE*TEMPO

SYMBOL IS VALUE OF CORRIDA
SYMBOL USED IS o



we20.SAS

SERIE DE FOURIER APLICADA A PLACA COM 20 TERMOS
 Dados we*t, onde $D1 = 3/4 * (a^{**2})$, $n=19$

20:50 FRIDAY, MAY 1, 1987

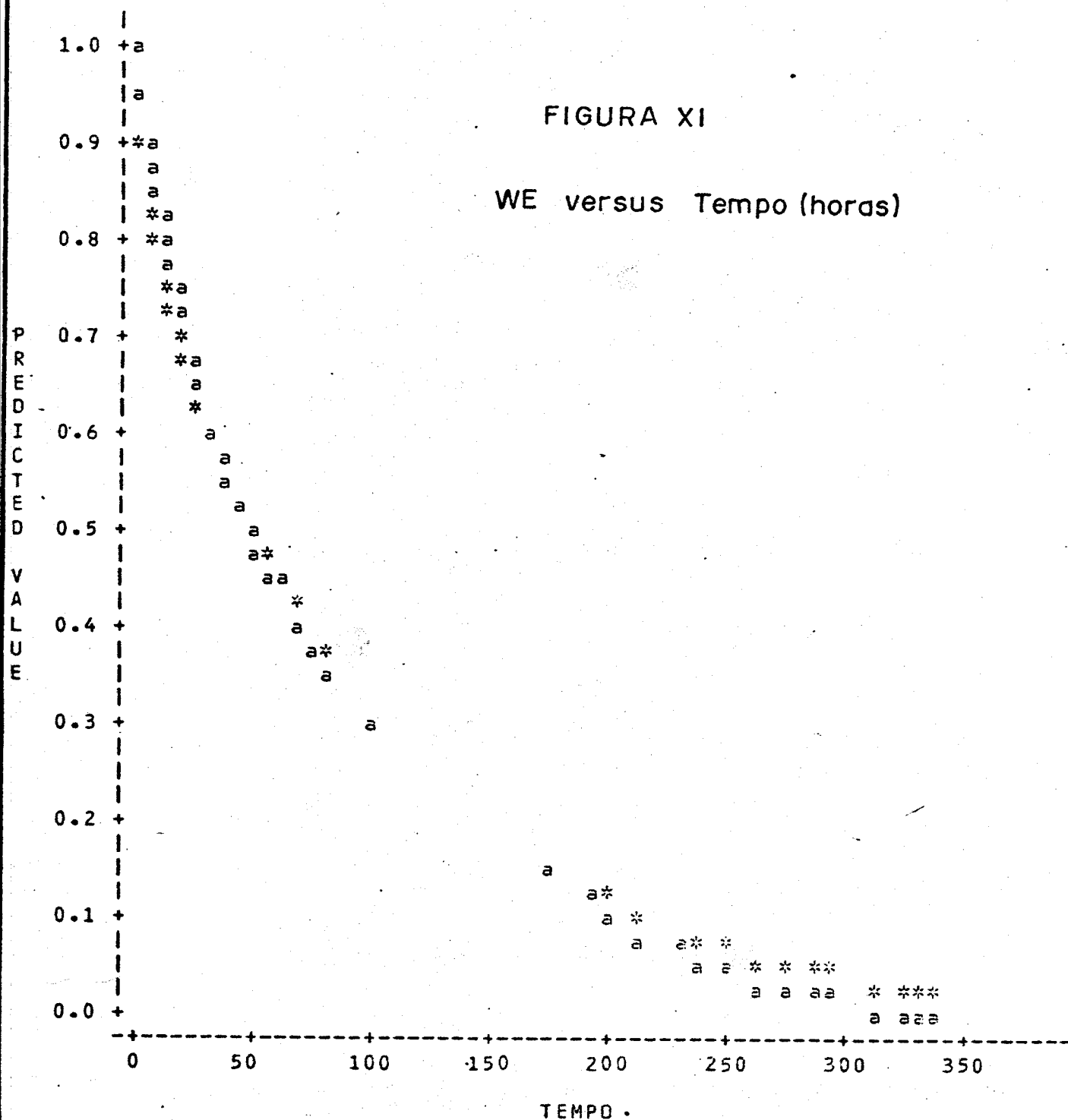
CORRIDA=a

PLOT OF WE*TEMPO
 PLOT OF PWE*TEMPO

SYMBOL IS VALUE OF CORRIDA
 SYMBOL USED IS *

FIGURA XI

WE versus Tempo (horas)



We20.SAS

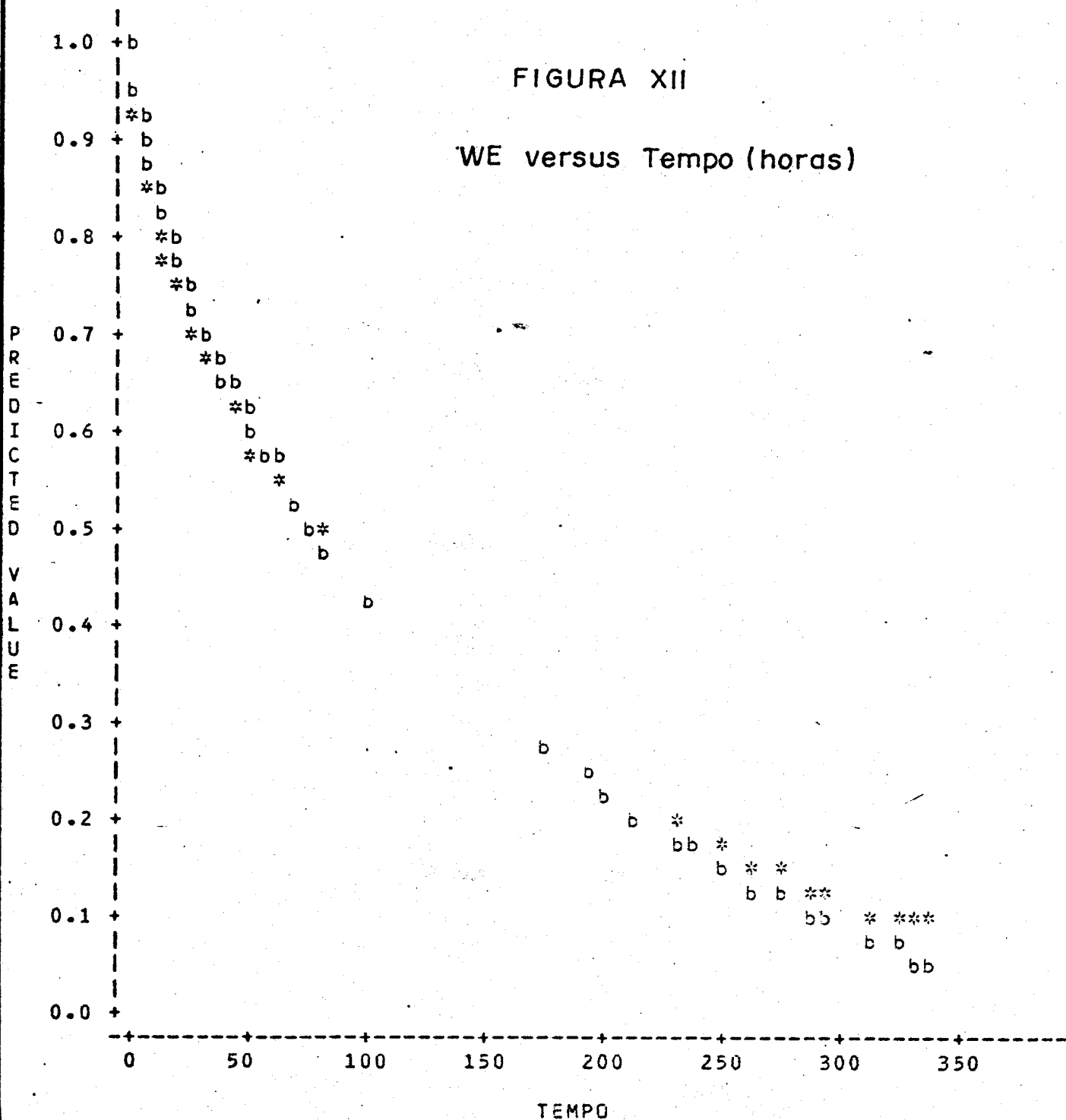
20:50 FRIDAY, MAY 1, 1987

CCRRIDA=5

SYMBOL IS VALUE OF CORRIDA
SYMBOL USED IS *

FIGURA XII

WE versus Tempo (horas)



CAMP

we20.SAS

SERIE DE FOURIER APLICADA A PLACA COM 20 TERMOS

Dados We*t, onde $D1 = D/4*(a**2)$, $n=19$

20:50 FRIDAY, MAY 1, 1987

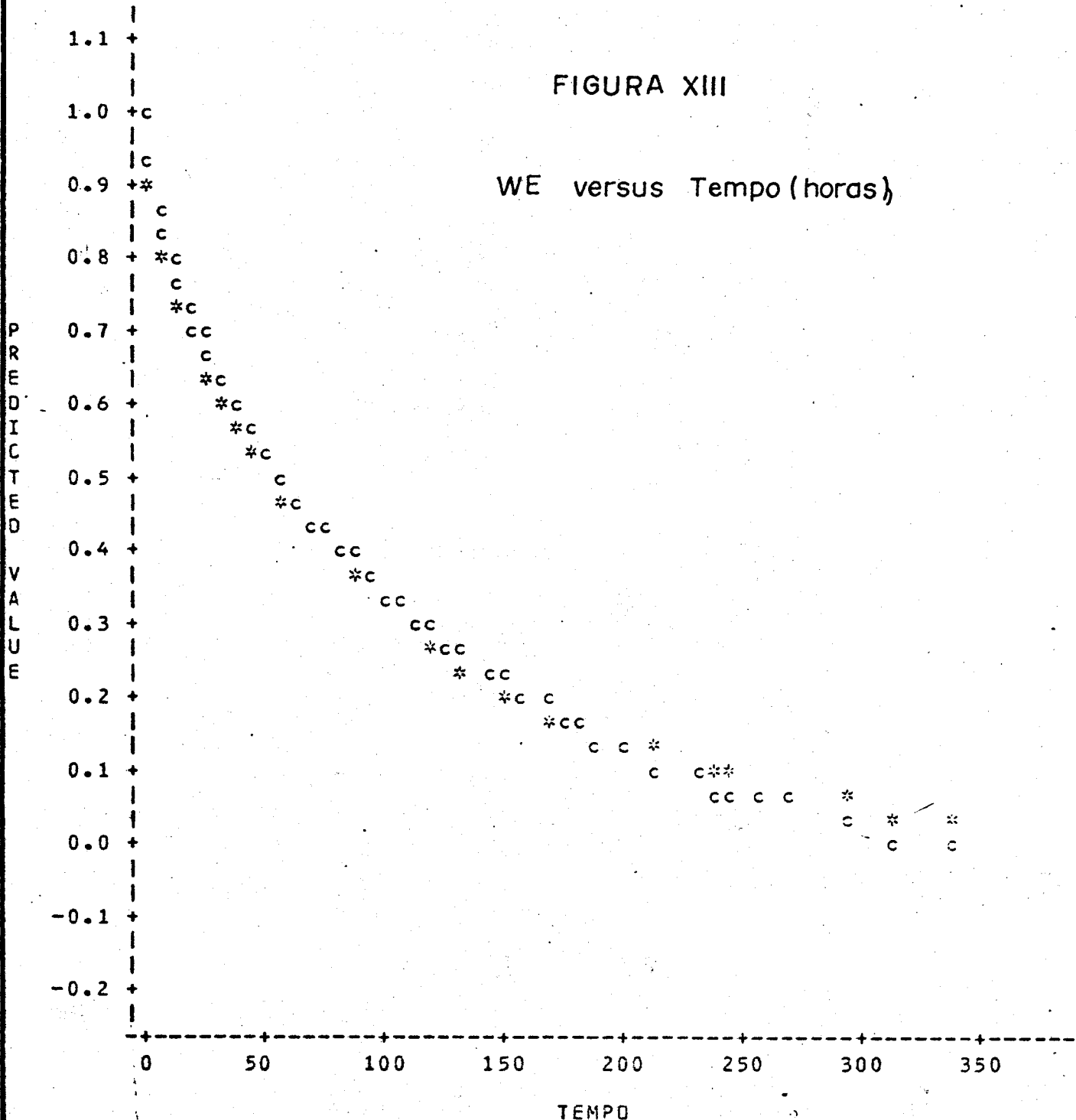
CORRIDA=c

PLOT OF WE*TEMPO
PLOT OF PWE*TEMPO

SYMBOL IS VALUE OF CORRIDA
SYMBOL USED IS *

FIGURA XIII

WE versus Tempo (horas)



CAMP

we20.SAS

SERIE DE FOURIER APLICADA A PLACA COM 20 TERMOS

Dados We*t, onde $D1 = C/4*(a**2)$, $n=19$

20:50 FRIDAY, MAY 1, 1987

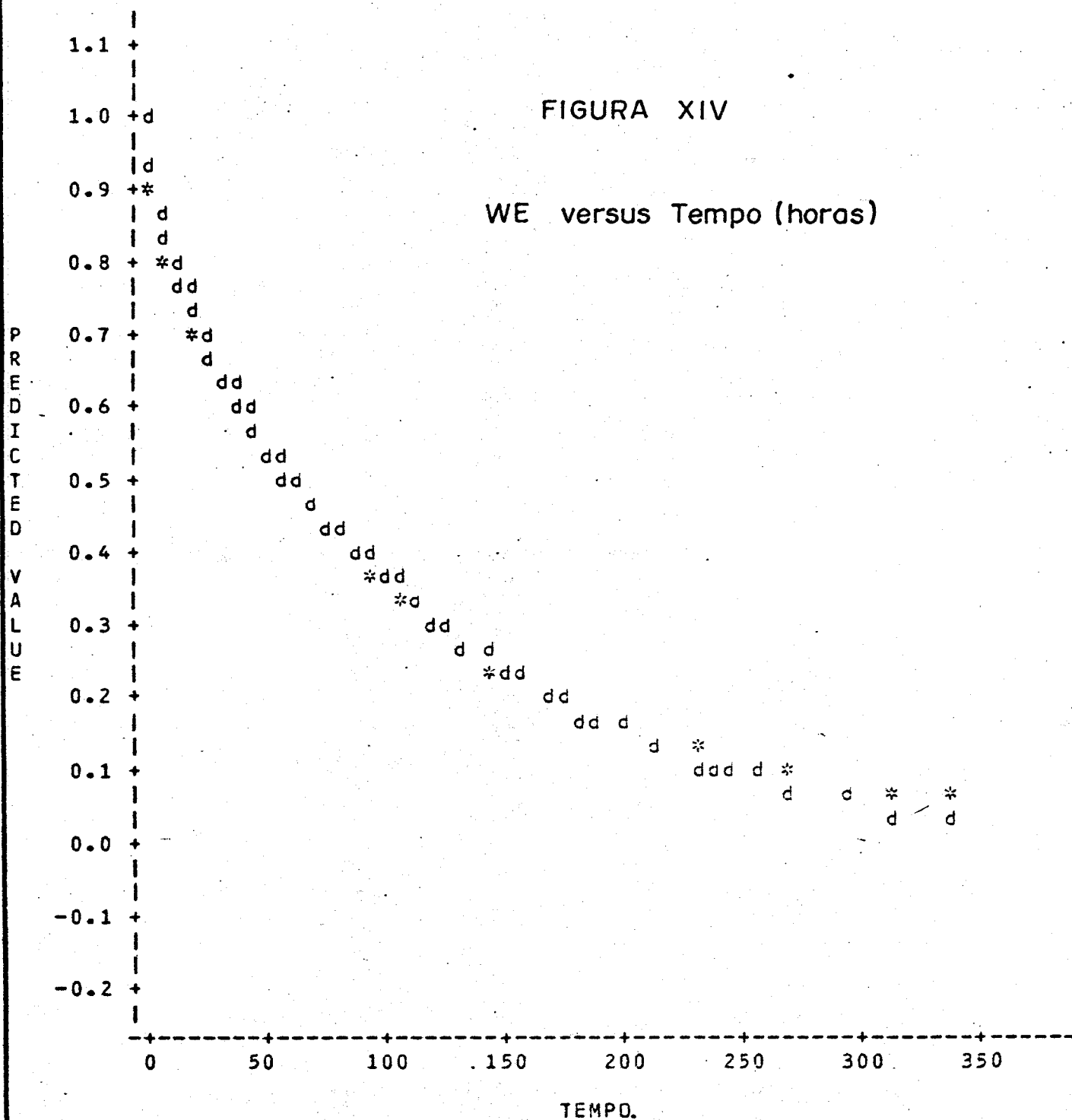
CORRIDA=d

PLOT OF WE*TEMPO
PLOT OF PWE*TEMPO

SYMBOL IS VALUE OF CORRIDA
SYMBOL USED IS *

FIGURA XIV

WE versus Tempo (horas)



CAMP

we20.SAS

SERIE DE FOURIER APLICADA A PLACA COM 20 TERMOS
 Dados We*t, onde $D1=D/4*(a**2)$, $n=19$

20:50 FRIDAY, MAY 1, 1987

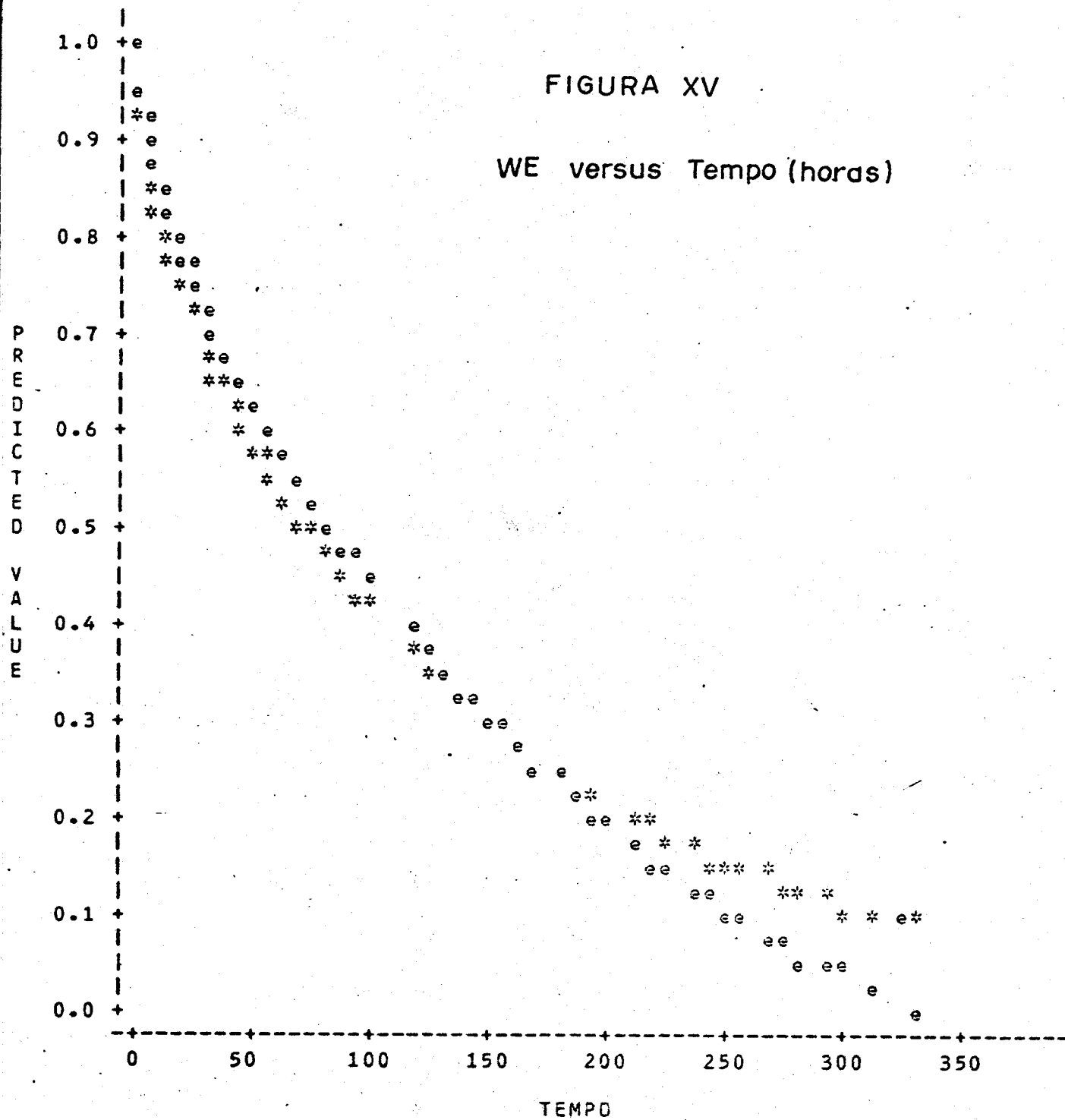
CORRIDA=e

PLOT OF WE*TEMPO
 PLOT OF PW2*TEMPO

SYMBCL IS VALUE OF CORRIDA
 SYMBCL USED IS *

FIGURA XV

WE versus Tempo (horas)



CAMP

we20.SAS

SERIE DE FOURIER APLICADA A PLACA COM 20 TERMOS
Dados we*t, onde $D1 = C/4*(a**2)$, $n=19$

20:50 FRIDAY, MAY 1, 1987

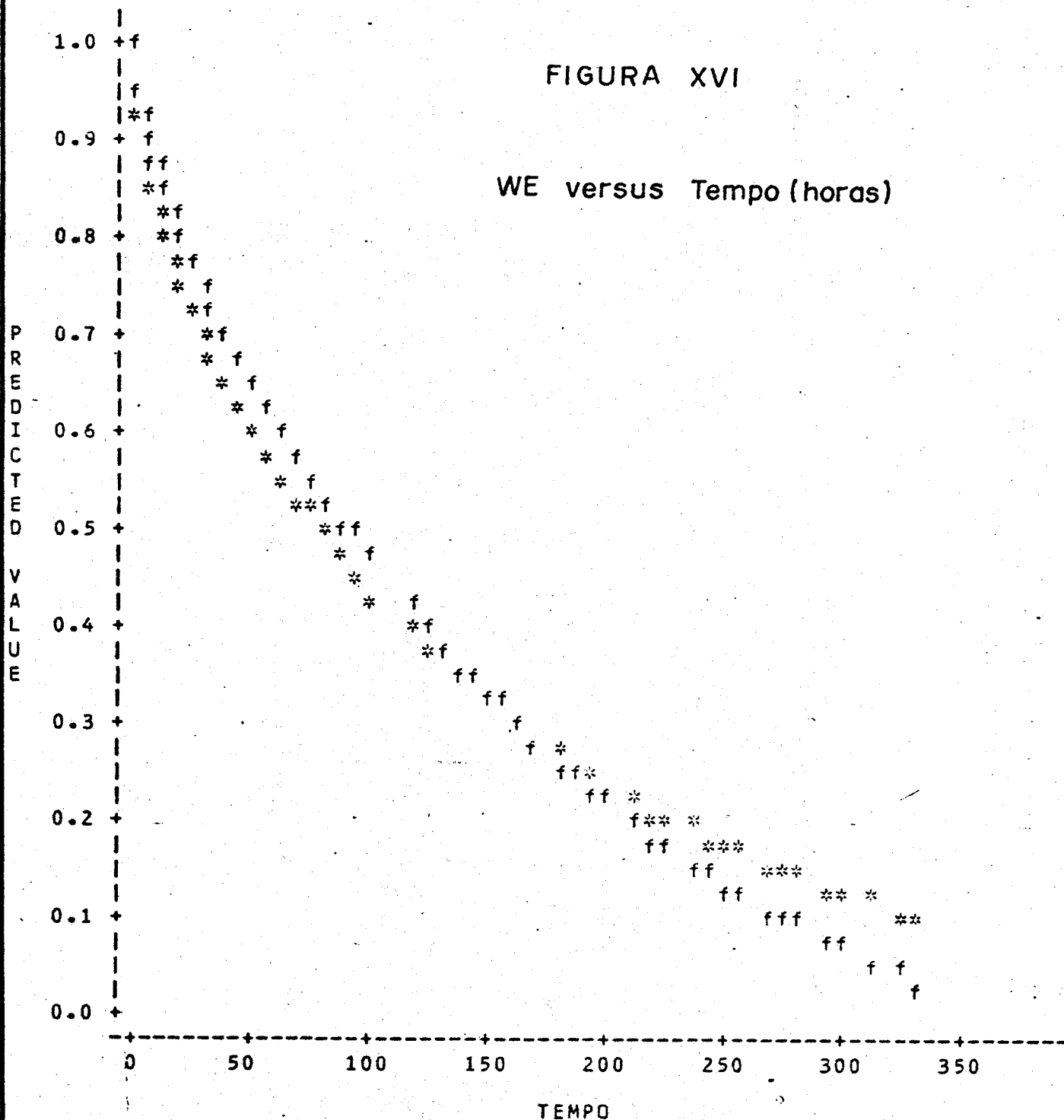
CORRIDA=f

PLOT OF WE*TEMPO
PLOT OF PWE*TEMPO

SYMBOL IS VALUE OF CORRIDA
SYMBOL USED IS *

FIGURA XVI

WE versus Tempo (horas)



CAMP

We20.SAS

SERIE DE FOURIER APLICADA A PLACA COM 20 TERMOS
 Dados We*t, onde $D1=C/4*(a**2)$, $n=19$

20:50 FRIDAY, MAY 1, 1987

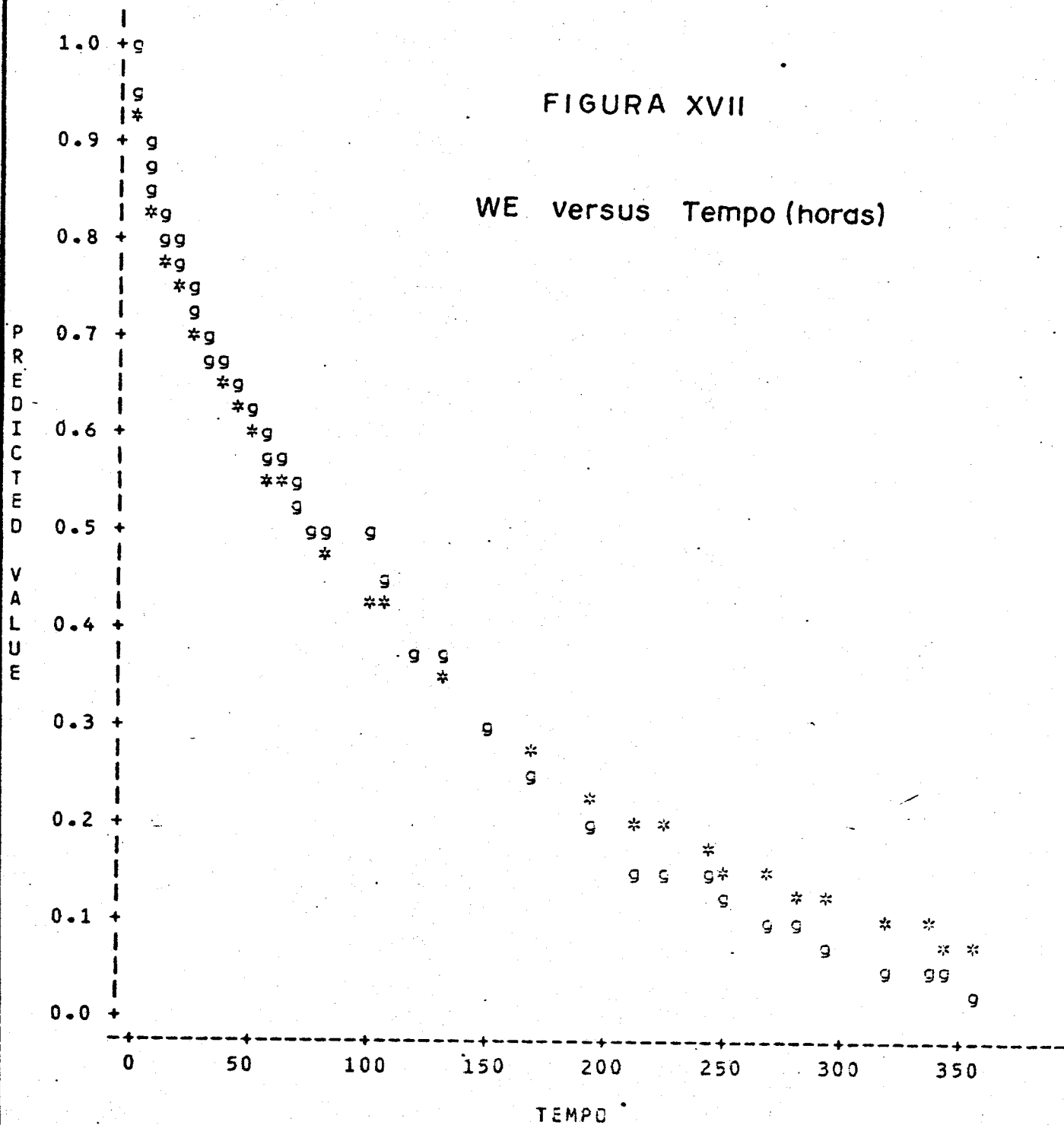
CORRIDA=g

PLOT OF WE*TEMPO
 PLOT OF PWE*TEMPO

SYMBOL IS VALUE OF CORRIDA
 SYMBOL USED IS *

FIGURA XVII

WE versus Tempo (horas)



CAMP

we20.SAS

SERIE DE FOURIER APLICADA A PLACA COM 20 TERMOS

Dados We*t, onde $D1 = C/4*(a**2)$, $n=19$

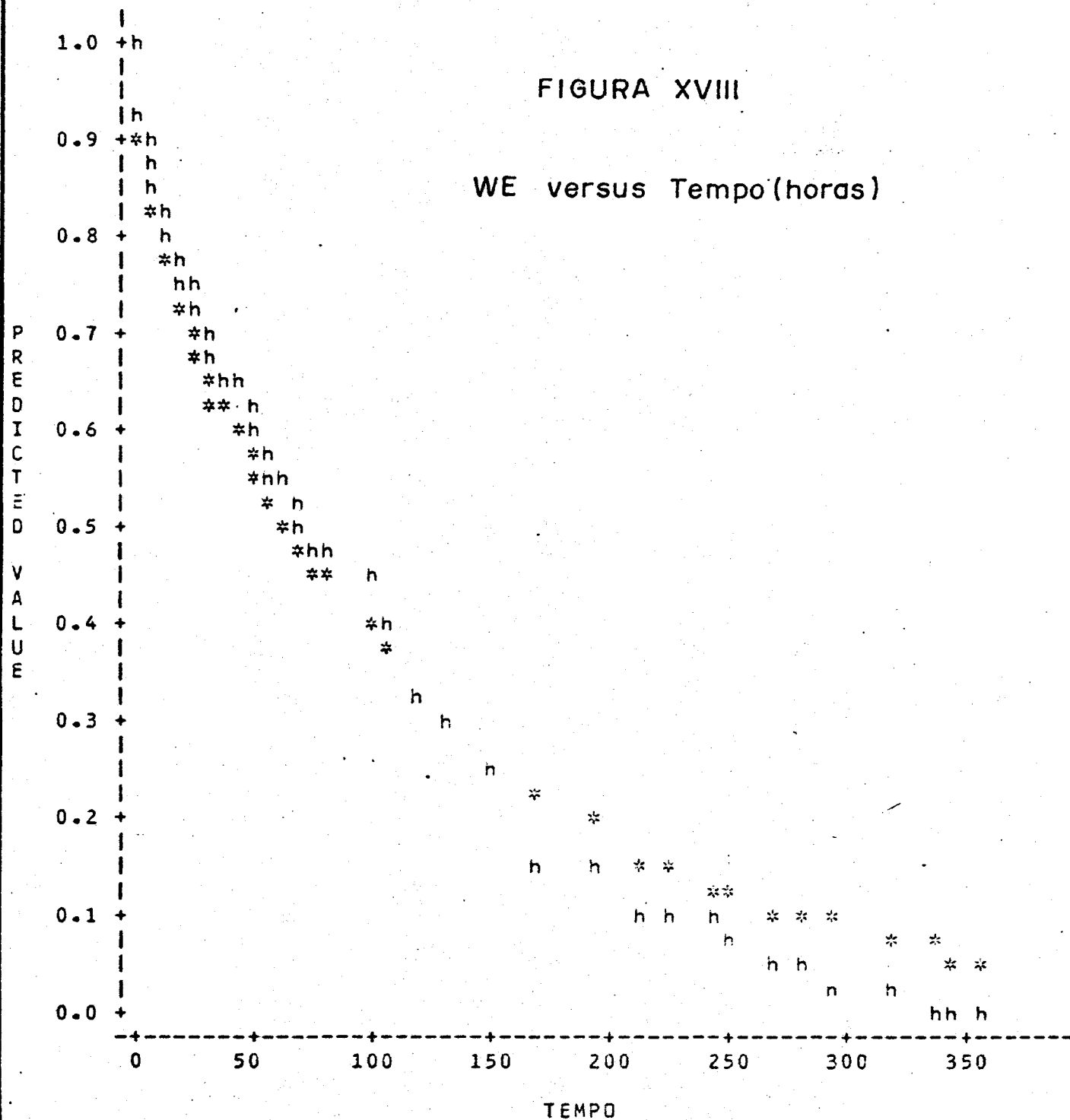
20:50 FRIDAY, MAY 1, 1987

CORRIDA=h

PLOT OF WE*TEMPO
PLOT OF PWE*TEMPOSYMBOL IS VALUE OF CORRIDA
SYMBOL USED IS *

FIGURA XVIII

WE versus Tempo(horas)



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguerre, R.J., Suarez, C. & Violloz, P.E. 1982. Drying kinetics of rough rice grain. *Journal of Fd. Technol.* 17. 679-689.
- Aguerre, R.J., Gabitto, J.F. & Chirife, J. 1985. Utilization of diffusion coefficients in food processes controlled by internal diffusion. *Journal of Fd. Technol.* 20 (5), 623 - 629.
- Ali Aski, B. 1982. Physics of drying. In: The production and storage of dried fish. Food and Agriculture Organization of The United Nations. Rome. p. 194 - 201.
- Alvarenga, L.C., Forster, M., Pinheiro Filho, J.B. & Hara, T. 1980. Transporte de umidade no interior de grãos de feijão preto sob condições de secagem. *Revista Brasileira de Armazenamento.* 5 (1), 5 - 18.
- Balaban, M. & Pigott, G.M. 1986. Shrinkage in fish muscle during drying. *Journal of Fd. Science.* 51 (2), 510 - 511.
- Becker, H.A. & Sallans, H.R. 1955. A study of internal moisture movement in the drying of the wheat kernel. *Cereal Chemistry.* 32 (3). 212 - 226.
- Beraquet, N.J., Okada, M., Ferreira, V.L.P. & Menezes, H.C. 1975. Um processo rápido de salga e secagem de peixe - Aspectos de processamento e aceitabilidade. *Coletânea do I.T.A.L.* vol 6. p 37 - 49.
- Carslaw, H.S. & Jaeger, J.C. 1959. *Conduction of Heat in Solids.* Oxford University Press. 2nd ed. 510 p.
- Charm, S.E. 1971. Dehydration of foods. In: *The Fundamentals of Food Engineering.* 2nd ed. The AVI Publishing Company, Inc. p. 294 - 404.
- Chirife, J. & Brunello, G. 1980. Drying R & D in Latin American Countries. In: *Drying' 80* vol. 1 Hemisphere Publishing Corporation. p. 16 - 19.
- Crank, J. 1975. *The Mathematics of Diffusion.* 2nd ed. Clarendon Press. Oxford. 414 p.

- Daudin, J.D. 1983. Calcul des cinétiques de séchage par l'air chaud des produits biologiques solides. Sciences des Aliments. 3 (1). 1 - 36.
- De Vries, D.A. 1975. Heat transfer in soils. In: Heat and Mass Transfer in The Biosphere. John Wiley & Sons. N.Y. p 5 - 28.
- Fornell, A., Bimbenet, J.J. & Almin, Y. 1980. Experimental study and modelization for air drying of vegetable products. Lebensm - Wiss. u. Technol. 14. 96 - 100.
- Fortes, M. & Okos, M.R. 1978. Heat and mass transfer in higroscopic capillary extruded products. The 71st Annual Meeting of The A.I.Ch.E. Florida. 44 p.
- Fortes, M., Okos, M.R. & Barrett Jr., J.R. 1981. Heat and mass transfer analysis of intra-kernel wheat drying and rewetting. Journal Agric. Engng. Res. 26 (2). 109 - 125.
- Fortes, M., Okos, M.R. & Pinheiros Filho, J.B. 1982. Modeling dryeration processes. In: Drying' 82. Hemisphere Publishing Corporation. N.Y. p 12 - 18.
- Gabitto, J.F. & Aguerre, R.J. 1985. Solucion numerica del processo de secado con cambio de volumen. Rev. Lat. Transf. Cal. Mat. 9 (3/4). 231 - 240.
- Geromel, E.J. & Forster, R.J. 1982. Princípios fundamentais em tecnologia de pescados. In: Série Tecnologia Industrial. Secretaria de Ind. Com. Ciên. e Tecn. Estado de S.P. 127 p.
- Görling, P. 1958. Cited by Charm, S.E. Dehydration of foods In: The Fundamentals of Food Engineering. The AVI Publishing Company, Inc. p 348.
- Harmathy, T.Z. 1969. Simultaneous moisture and heat transfer in porous systems with particular reference to drying. I. & E.C. Fundamentals. 8 (1). 92 - 103.
- Heldman, D.R. 1975. Food dehydration. In: Food Process Engineering. The AVI Publishing Company, Inc. p 237 - 311.

- Hsu, K.H. 1983. A diffusion model with a concentration dependent diffusion coefficient for describing water movement in legumes during soaking. Journal Fd. Science. 48 (2). 618 - 645.
- Husain, A., Chen, C.S., Clayton, J.T. & Whitney, L.F. 1972. Mathematical simulation of mass and heat transfer in high moisture foods. Transactions of the A.S.A.E. 15 (4) 732 - 736.
- Husain, A., Chen, C.S. & Clayton, J.T. 1973. Simultaneous heat and mass diffusion in biological materials. Journal Agric. Engng. Res. 18. 343 - 354.
- Jason, A.C. 1958. A study of evaporation and diffusion processes in the drying of fish muscle. In: Fundamental Aspects of The Dehydration of Foodstuffs. The Soc. of Chem. Ind. p 103 - 135.
- Jason, A.C. 1965. Drying and dehydration. In: Fish as Food. Academic Press. vol. III. N.Y. p 1 - 54.
- Keey, R.B. 1972. Drying - Principles and Practice. Pergamon Press. Oxford. 358 p.
- Kilpatrik, P.W., Lowe, E. & Van Arsdel, W.B. 1955. Tunnel dehydrators for fruits and vegetables. In: Advances in Food Research. vol. VI. Academic Press. N.Y. p 313 - 371.
- King, C.J. 1968. Rates of moisture sorption and desorption in porous, dried foodstuffs. Food Technology. 22 (4) 165 - 171.
- Kneule, F. 1966. El Secado. Ediciones Urmo. España. 414 p.
- Lewis, W.K. 1921. The rate of drying of solid materials. In: The Symposium on Drying. The Journal of I. & E. Ch. 13 (5). 427 - 432.
- Loncin, M. 1965. Dsecación. In: Tecnica de la Ingenieria Alimentaria. Editorial Dossat S.A. Madrid. p 523 - 632.
- Lozano, J.E., Rotstein, E. & Urbiscain, M.J. 1983. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. Journal of Fd. Science. 48 (5) 1497 - 1553.

- Luikov, A.V. Mikhailov, Yu.A. 1965. Theory of Energy and Mass Transfer. Pergamon Press. Oxford. 392 p.
- Luikov, A.V. 1966. Heat and Mass Transfer in Capillary - Porous Bodies. Pergamon Press. Oxford. 523 p.
- Madrid, R.M. & Copriva, M.A. 1984. Projeto Tubarão - Processamento e mercado de produtos oriundos do tubarão. Relatório Interno da SUDEPE. Brasília. 130 p.
- Mazza, G. & Lemaguer, M. 1980. Dehydration of onion: some theoretical and practical considerations. Journal Fd. Technol. 15. 181 - 194.
- Misra, R.N. & Young, J.H. 1980. Numerical solution of simultaneous moisture diffusion and shrinkage during soybean drying. Trans. of The A.S.A.E. 1277 - 1282.
- Nakano, M. & Miyazaki, T. 1979. The diffusion and non equilibrium thermodynamic equations of water vapor in soil under temperature gradients. Soil Science. 128 (3) 184 - 188.
- Nonhebel, G. & Moss, A.A.H. 1971. Simplified theory of the drying of solids. In: Drying of Solids in The Chemical Industry. Butterworth & Co. p 33 - 43.
- Park, K.J. 1980. Métodos matemáticos na engenharia de alimentos. Fundação Tropical de Pesquisa e Tecnologia "André Tosello". Campinas. 206 p.
- Park, K.J., Cornejo, F.E.P., Kang, T.A., Jardine, J.G. & Madrid, R.M. 1984. Processo e equipamento para secagem de materiais biológicos. XII Concurso Nacional do Invento Brasileiro - Prêmio Governador do Estado de S.P. p 11.
- Park, K.J. & Cornejo, F.E.P. 1987. Estudo de encolhimento do filé salgado de tubarão durante a secagem. V Congresso Brasileiro de Engenharia de Pesca. Fortaleza. julho/1987. 10 p. in press.
- Philip, J.R. 1975. Water movement in soil. In: Heat and Mass Transfer in The Biosphere. John Wiley & Sons. N.Y. p. 29 - 47.
- Porter, H.F., McCornik, P.Y., Lucas, R.L. & Wells, D.F. 1973.

Gas-solid systems. In: Chemical Engineers' Handbook.
5th ed. McGraw-Hill Co. sec. 20 - 4.

Powell, R.W. 1940. Further experiments on the evaporation of water from saturated surfaces. Transactions of The Inst. of Ch. Engn. 18. 36 - 55.

Schlünder, E.U. 1983. Prediction of drying rates. In: Heat Exchanger Design Handbook. Hemisphere Publishing Corporation. sec. 3.13.4.

Sherwood, T.K. 1929 a. The drying of solids - I. Industrial and Engineering Chemistry 21 (1). 12 - 16.

Sherwood, T.K. 1929 b. The Drying of solids - II. Industrial Engineering Chemistry 21 (10). 976 - 980.

Skelland, A.H.P. 1974. Diffusional mass transfer. John Wiley & Sons. N.Y. 510 p.

Suzuki, K., Kubota, K. Hasegawa, T. & Hosaka, H. 1976. Shrinkage in dehydration of root vegetables. Journal of Fd. Science. 41 (5). 1189 - 1193.

Torrano, A.D.M. & Okada, M. 1977. Processamento do cação salga do e seco. Boletim do I.T.A.L. 54 (nov/dez). 153 - 166.

Van Arsdel, W.B. 1947. Approximate diffusion calculations for the falling - rate phase of drying. Transaction American Institute Chemical Engineers. 43 (1). 13 - 24.

Van Arsdel, W.B. & Copley, M.J. 1963. Characteristics of food substances related to drying behavior. In: Food Dehydration. vol. 1. The AVI Publishing Company, Inc. p 66 - 89.

Viollaz, P. & Suarez, C. 1985. Drying of shrinking bodies. A. I.Ch.E. Journal. 31 (9). 1566 - 1568.

Whitaker, S. 1980. Heat and mass transfer in granular porous media. In: Advances in Drying. vol.1. Hemisphere Publishing Corporation. p 23 - 61.

Whitaker, T., Barre, H.J. & Hamdy, M.Y. 1969. Theoretical and experimental studies of diffusion in spherical bodies with a variable diffusion coefficient. Transactions of The A.S.A.E. 668 - 672.