

PROPRIEDADES FÍSICAS E PRÉ-RESFRIAMENTO
DE UMBU (*Spondias tuberosa* Arruda Câmara)

Dissertação apresentada ao Curso de
Mestrado em Engenharia Agrícola da
Universidade Federal da Paraíba, em
cumprimento às exigências para obten-
ção do grau de Mestre.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Processamento e Armazenamento de Produtos
Agrícolas

ORIENTADOR:

MÁRIO EDUARDO RANGEL MOREIRA CAVALCANTI MATA

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA

JANEIRO - 1994

PROPRIEDADES FÍSICAS E PRÉ-RESFRIAMENTO
DE UMBU (*Spondias tuberosa* Arruda Câmara)

por

ALEXANDRE JOSÉ DE MELO QUEIROZ

Dissertação aprovada em 12 de janeiro de 1994

APROVADA:

Mário ERM Mata

Prof. MÁRIO EDUARDO RANGEL MOREIRA CAVALCANTI MATA (M.Sc)
Orientador

AB

Prof. HÉLIO FRANCISCO BEZERRA (M.Sc)
Co-Orientador

JAR

Prof. JOSÉ ANTONIO DERMENGI RIOS (Dr.)
Examinador

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA

JANEIRO - 1994

DIGITALIZAÇÃO:

SISTEMOTECA - UFCG

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	vi
RESUMO	vii
SUMMARY	ix
1 - INTRODUÇÃO	01
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	06
2.1 - Volume	06
2.2 - Circularidade	08
2.3 - Esfericidade	09
2.4 - Massa específica	11
2.5 - Calor específico	12
2.6 - Resfriamento de frutas	15
2.7 - Parâmetros físicos ligados a transferência de calor	19
2.7.1 - Condutividade térmica	19
2.7.2 - Difusividade térmica	22
2.7.3 - Coeficiente de filme	24
2.7.4 - O fator f e taxa de resfriamento	27
2.7.5 - Meio tempo de resfriamento	29
2.7.6 - Fator de atraso	30
2.8 - Equações aplicadas ao resfriamento	31
3 - MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 - Determinação das propriedades físicas	39
3.2 - Resfriamento	42
3.2.1 - Determinação dos parâmetros envolvidos no resfriamento	45
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1 - Maturidade	50
4.2 - Dimensões	51
4.3 - Circularidade	53
4.4 - Esfericidade	54
4.5 - Massa e massa específica	56
4.6 - Calor específico	57

4.7 - Coeficiente de filme	57
4.8 - Raiz da equação transcendental	58
4.9 - Condutividade térmica	59
4.10 - Difusividade térmica	60
4.11 - Número de Biot	62
4.12 - Fator de atraso	62
4.13 - Taxa de resfriamento e fator f	64
4.14 - Meio tempo de resfriamento	65
4.15 - Curvas de resfriamento	66
5 - CONCLUSÕES	68
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
APÊNDICE A	76
APÊNDICE B	85
APÊNDICE C	94
APÊNDICE D	132
APÊNDICE E	144

LISTA DE FIGURAS

FIGURAS		PÁGINA
01	Vista do calorímetro com medidor de temperatura	41
02	Vistas da montagem experimental no interior da câmara de resfriamento e externamente com o medidor de temperatura da câmara	44
03	Representação gráfica das médias dos resfriamentos	67

LISTA DE TABELAS

TABELAS		PÁGINA
01	Teste de penetração em frutos com 500 g de carga	48
02	Dimensões dos frutos	49
03	Dados de volume	50
04	Dados de circularidade	51
05	Dados de esfericidade	52
06	Dados de massa e massa específica	53
07	Número de Reynolds e coeficiente de filme	55
08	Dados da raiz da equação transcendental	56
09	Dados de condutividade térmica	57
10	Dados de difusividade térmica	58
11	Valores calculados para o NB_i	59
12	Dados de fator de atraso	60
13	Dados da taxa de resfriamento	61
14	Dados do tempo de resfriamento	62
15	Dados do meio tempo de resfriamento	63

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi identificar o umbu quanto às suas propriedades físicas (dimensões, volume, massa, massa específica, circularidade e esfericidade), térmicas (calor específico, coeficiente de filme, condutividade e difusividade térmica, fator de atraso, taxa de resfriamento e o meio tempo de resfriamento), e seu comportamento quando submetido ao pré-resfriamento a ar forçado a 2,8 m/s e sob seis temperaturas de resfriamento ($-20,3^{\circ}\text{C}$; $-17,0^{\circ}\text{C}$; $-15,5^{\circ}\text{C}$; $-13,6^{\circ}\text{C}$; $-11,9^{\circ}\text{C}$ e $-9,8^{\circ}\text{C}$).

Os valores obtidos para as dimensões, medidas pelos três eixos mutuamente perpendiculares são 36,0, 34,0 e 32,0 mm para os eixos longitudinal, transversal maior e transversal menor (valores médios) respectivamente; o volume médio obtido é de 22,0 cm^3 ; as massas média e específica são de 24,0 g e 1,06 g/cm^3 , respectivamente; a circularidade e a esfericidade médias são respectivamente 87,0% e 92,0%. Quanto as propriedades térmicas, têm-se para o calor específico, o valor de 0,6667 $\text{cal}/\text{g}^{\circ}\text{C}$; o coeficiente de filme tem um valor médio de 47.000 $\text{cal}/\text{hm}^2^{\circ}\text{C}$; a condutividade e a difusividade térmicas médias estão em torno de 167,0 $\text{cal}/\text{hm}^{\circ}\text{C}$ e $0,06575 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente; o fator de atraso, a taxa de resfriamento e o meio tempo de resfriamento, em média tem os valores respectivos de 1,3, 5,4 h^{-1} e de 0,13 h.

Sob as condições do experimento conclui-se que o umbu tem formas regulares. Sua esfericidade varia de 86 a 98%, a circularidade está entre 79 e 99%, seu volume entre 15 e 32 cm³ e sua massa específica entre 1,02 e 1,18 g/cm³. A condutividade térmica do umbu varia de 157 a 178 cal/h.m°C, se enquadrando na faixa intermediária entre aquelas dos grãos e as dos frutos com sementes pequenas; a difusividade térmica está entre 0,05941 e 0,07004 m²/s; o calor específico obtido é de 0,6667 cal/g°C.

O pré-resfriamento sob as condições empregadas não demonstrou diferenças de tempo de resfriamento na faixa de temperatura do meio resfriante entre -10°C e -20°C, como mostram a taxa de resfriamento, o fator de inclinação e o meio tempo de resfriamento que não apresentam valores ascendentes com o aumento da temperatura de resfriamento, indicando-se a temperatura de -10°C por ser a mais econômica.

SUMMARY

The objective of this work was to identify umbu's physical properties (dimensions, volume, mass, specific gravity, roundness and sphericity), its thermal properties (specific heat, film coefficient, conductivity and thermal diffusivity, lag factor, cooling rate, and cooling half-time) and its behavior when submitted to precooling by forced air at 2.8 m/s under six cooling temperatures (-20.3°C ; -17.0°C ; -15.5°C ; -13.6°C ; -11.9°C ; e -9.8°C).

The values obtained for the dimensions, measured under three perpendicular axis, are 36.0, 34.0 and 32.0 mm for the longitudinal axis, major transversal and minor transversal (average values) respectively, the average volume obtained is 22.0 cm^3 ; the average mass and specific gravity are 24.0 g and 1.06 g/cm^3 , respectively. As regards thermal properties, the values of specific heat is $0.6667\text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$; the film coefficient has an average value of $47000\text{ cal/hm}^2^{\circ}\text{C}$; the average conductivity and thermal diffusivity are around $167.0\text{ cal/hm}^{\circ}\text{C}$ and $0.06575 \times 10^6\text{ m}^2/\text{s}$ respectively; the lag factor, cooling rate and the cooling half-time have average values of 1.3, 5.4 h^{-1} and 0.13 h.

Under experimental conditions it is concluded that umbu has regular forms. Its sphericity varies between 86 and 98%, its roundness between 79.9 and 99.0%, its volume between 15.0 and 32 cm^3 and its specific gravity between 1.02 and 1.18 g/cm^3 . The

thermal conductivity of umbu varies from 157 to 178 cal/hm°C, positioning itself in an intermediate range between grain and small-seed fruits; the thermal diffusivity between 0.05941 and 0.07004 m²/s; the specific heat obtained is 0.6667 cal/g°C.

The precooling under the applied conditions did not show differences in the cooling time over the range of cooling medium between -10°C and -20°C, as is show by cooling factor, inclination factor and cooling half-time wich did not present rising values with increasing cooling temperature, indicating the -10°C temperatures as being more economical.

1 - INTRODUÇÃO

O umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda Câmara) pertence a família das anacardiáceas. É uma árvore xerófila de raízes tuberosas, horizontais, que ocupam o primeiro metro de profundidade do solo. Sua maior ocorrência se dá em locais com pluviosidade entre 400 e 800 mm, chuvas de janeiro a maio, temperatura do ar variando de 12 a 38 °C, umidade relativa de 30 a 90% e insolação anual entre 2.000 e 3.000 horas.

Atinge até 6 metros de altura e 10 metros de diâmetro da copa. As folhas são compostas, com 10 a 15 cm de comprimento. Cada folha é constituída de 5 a 9 folíolos oblongo-ovalados, subdentados ou inteiros com 2,5 a 4,0 cm de comprimento.

As flores são produzidas em inflorescências do tipo panícula (ANÔNIMO, 1967).

O fruto é uma drupa glabra ou levemente pilosa com epicarpo amarelo-esverdeado e mesocarpo de sabor ácido-adocicado (SILVA & SILVA, 1974).

Em termos de rendimento, a produção anual de um espécime foi avaliada através de sucessivas pesagens em cerca de 300 kg. Considerando um plantio organizado com 25 exemplares por hectare, um pomar adulto produziria 7,5 toneladas/ha de frutos por ano (DUQUE, 1980).

O umbu destaca-se como uma fruta típica do semi-árido nordestino, sendo largamente aceita pela população, que a consome tanto "in natura" como na forma de sorvetes, geléias, sucos, doces. Além da reconhecida aceitabilidade do seu sabor, o umbu se constitui numa importante fonte de vitamina C. SOUZA (1970) constatou a presença de 14,2 mg de ácido ascórbico por 100 ml de suco de polpa madura. Na polpa verde este valor atingiu 33,3 mg.

Apesar destas qualidades que fazem desse produto uma riqueza da região, ocorrem dois problemas que limitam o seu consumo, sendo um deles a sazonalidade e o outro a perecibilidade.

A sazonalidade limita o seu consumo ao período de quatro meses em que dura a safra, período este de grande produção e grandes perdas, devido a inexistência de uma infra-estrutura adequada de exploração.

→ A perecibilidade é um fator comum entre as frutas e tanto os seus mecanismos como as formas de atenuar seus efeitos tem sido estudados por diversos pesquisadores.

→ BENNETT (1964) afirma que a partir do momento em que as frutas ou produtos vegetais são removidos da planta mãe, começam a morrer e a duração da vida depende da taxa em que o produto usa sua energia estocada, no esforço para permanecer vivo.

De acordo com SHOWALTER (1970), o tempo de vida de frutas durante a armazenagem varia de poucos dias a muitos meses e é governado principalmente pelas condições de estocagem, respiração, danos fisiológicos, grau de maturação, transpiração e

danos mecânicos.

Entre os fenômenos fisiológicos de pós-colheita, a respiração deve merecer uma atenção especial, pois constitui o fenômeno básico para obtenção da energia que os tecidos vegetais necessitam. Através dela é possível a continuação das transformações metabólicas a fim de completar a maturação (ROCHA & SPAGNOL, S/D). Quanto maior a taxa de respiração, menor será o tempo de vida do fruto ou vegetal colhido (LAJOLO, 1979).

A redução rápida da intensidade de respiração é conseguida por meio do abaixamento da temperatura. Isto porque a baixa temperatura no armazenamento reduz os processos de maturação e senescência e retarda o desenvolvimento dos microorganismos que possam estar presentes (BLEINROTH, 1973).

⇒ A preservação de frutas por meio do frio é baseada sobretudo no fato de que baixas temperaturas retardam a ação dos fenômenos metabólicos (ROCHA & SPAGNOL, S/D).

O uso do frio como agente preservador se apresenta como uma solução para viabilizar comercialmente a exploração do umbu, possibilitando a regularização da oferta, a implantação de uma estrutura industrial de processamento e a sua colocação em mercados distantes sob condições refrigeradas de transporte e estocagem.

A refrigeração em níveis de temperatura acima do ponto de congelamento deve ser feita preferencialmente em duas etapas, quais sejam, o pré-resfriamento e o resfriamento propriamente

dito. Segundo BARBOSA (1976), no pré-resfriamento leva-se o alimento a uma temperatura positiva próxima de 0°C (geralmente cerca de 5°C) com a finalidade de diminuir a diferença de temperatura existente entre o alimento e a do ambiente onde vai estar submetido ao resfriamento propriamente dito.

O uso do pré-resfriamento permite o emprego de temperaturas inferiores às usadas no resfriamento uma vez que o produto permanece pouco tempo sob aquelas temperaturas, não atingindo o equilíbrio térmico com o meio. Isto possibilita um abaixamento de temperatura mais rápido, favorecendo a preservação das qualidades iniciais do alimento e reduz a oscilação de temperatura na câmara de resfriamento devida à carga térmica introduzida pelo produto recém chegado.

O conhecimento das propriedades físicas do umbu e do seu comportamento térmico quando submetido ao pré-resfriamento sob diferentes condições, permitirá o dimensionamento adequado de sistemas de armazenagem frigorificada do produto, fornecendo subsídios para projetos que visem sua exploração.

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi a determinação de algumas propriedades físicas do umbu e o seu comportamento térmico quando submetido ao processo de pré-resfriamento usando o ar como meio refrigerante, com seis condições diferentes de temperatura e convecção forçada.

No estudo das propriedades físicas foram determinados os seguintes parâmetros:

- Tamanho, volume, circularidade, esfericidade e massa específica dos frutos;

Quanto ao comportamento, térmico foram verificados:

- Curvas de resfriamento dos frutos para cinco diferentes temperaturas ($-20,3^{\circ}\text{C}$; $-17,0^{\circ}\text{C}$; $-15,5^{\circ}\text{C}$; $-13,6^{\circ}\text{C}$; $-11,9^{\circ}\text{C}$ e $-9,8^{\circ}\text{C}$) sob convecção forçada do ar a $2,8\text{ m/s}$;
- Determinação do calor específico, coeficiente de filme, condutividade térmica, difusividade térmica, fator de atraso, taxa de resfriamento e meio tempo de resfriamento.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo das propriedades físicas de um produto agrícola justifica-se na medida em que se deseje implantar uma exploração baseada em meios mecânicos. Tamanho, forma, volume, são algumas das características físicas importantes em muitos problemas associados ao desenho de máquinas específicas ou na análise do comportamento do produto, no manuseio do material (MOHSENIN, 1978). O autor menciona como exemplos, o problema de separação de grãos e sementes de materiais indesejáveis por sistemas pneumáticos e eletrostáticos e também a questão do emprego de cartas para a resolução de problemas de transferência de calor. Para o uso destas cartas faz-se necessário a aproximação da forma do produto para a forma de uma placa, uma esfera ou outra a que aquela mais se assemelhe. Sugere termos para descrever a forma tais como regular, irregular, assimétrica, truncada, elíptica, oblíqua, oval, cônica, alongada, esferóide.

2.1 - Volume

A determinação do volume em alimentos tem encontrado várias aplicações, seja na separação de materiais indesejáveis (MAAK, 1957), no desenho de silos (OTIS, 1957), separação e classificação (KUNKEL *et alii* 1952). Os autores destacam a dificuldade de medir este parâmetro em materiais agrícolas, devido à forma irregular em muitos deles, às pequenas dimensões de alguns, tais como grãos e sementes e a sua natureza porosa.

MOHSENIN (1978) cita vários métodos utilizados na determinação do volume de amostras: balança de peso específico, tubo gradiente de peso específico, picnômetro de comparação a ar e balança de plataforma. Este último, de aplicação simples, é aplicado para materiais maiores, como frutas e vegetais e o procedimento baseia-se na pesagem do volume de água deslocado pela imersão total do corpo no meio líquido. Da relação entre a massa de água correspondente ao volume deslocado e a massa específica da água, obtêm-se o volume do produto.

GRIFFITS & SMITH (1964), definiram o volume de um conjunto de seixos através de suas dimensões axiais usando a seguinte relação:

$$V = a_1^{b_1} \cdot a_2^{b_2} \cdot a_3^{b_3} \dots a_n^{b_n} \quad (01)$$

Onde V é o volume do exemplar, $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ são diâmetros internos do corpo, considerando-os como medidas do tamanho e $b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$, são constantes que dependem do produto. Aplicando logaritmo a ambos os membros da equação (01) tem-se a expressão linear:

$$\log V = b_1 \log a_1 + b_2 \log a_2 + b_3 \log a_3 + \dots + b_n \log a_n \quad (02)$$

GOULDEN (1952) usando o método de regressão linear múltipla estabeleceu uma relação entre o volume e as dimensões axiais. A contribuição de cada eixo ao volume foi determinada usando o método de análise de variância. Foi encontrada uma relação linear bem definida entre o logaritmo das dimensões axiais e o logaritmo do volume dos seixos. Os três eixos perpendiculares

forneceram uma estimativa de volume com 93% de precisão. Desta percentagem total, o eixo intermediário contribuiu com apenas 4% da estimativa de volume, ou seja, o uso de apenas os dois eixos principais, maior e menor, conduziu a uma boa informação sobre a variação do logaritmo do volume.

Outra proposta de cálculo de volume através da medida dos três eixos, maior, menor e longitudinal foi feita por HOUSTON (1957). Neste método, a média das áreas projetadas obtidas com as medidas dos três eixos e definida como área média, conduz ao cálculo de um volume que difere do volume experimental por um fator constante determinado.

Uma forma indireta de determinação de volume foi proposta por QUENOVILLE (1952) na determinação desta propriedade em grãos de milho:

$$\ln V = -6,18 + 0,8 \ln a + 0,71 \ln b + 0,68 \ln c \quad (03)$$

Onde: a => Eixo maior (mm);

b => Eixo menor (mm);

c => Eixo longitudinal (mm);

V => Volume de grão.

2.2 - Circularidade

Segundo Curray citado por CAVALCANTI MATA (1984), circularidade é a medida da agudeza das arestas ou cantos de um sólido. De acordo com o autor citado, a circularidade é um fator que indica o quão próximo está a área de um objeto, de um circu-

10. Propõe duas fórmulas para esta medida, sendo a primeira:

$$\text{Circularidade} = A_p/A_c \quad (04)$$

Onde: A_p => Maior área projetada do objeto na posição natural de repouso;

A_c => Área do menor círculo que circunscreve a projeção.

e a outra:

$$\text{Circularidade} = \sum r/N.R \quad (05)$$

Onde: r => Raios dos círculos inscritos internamente nos ângulos da projeção do objeto;

R => Raio do maior círculo possível de ser inscrito na projeção;

N => Número total de ângulos internos da projeção.

2.3 - Esfericidade

De acordo com MOSHENIN (1978), o conceito de esfericidade se baseia na característica isoperimétrica da esfera e sugere uma forma de estimar a esfericidade de um objeto:

$$\text{Esfericidade} = d_e/d_c \quad (06)$$

Onde d_e é o diâmetro da esfera com o mesmo volume do objeto e d_c é o diâmetro da menor esfera que o circunscreve ou usualmente, o maior diâmetro do objeto. Esta expressão para esfericidade compara a forma característica do sólido com a esfera de

mesmo volume.

Assumindo o volume do sólido igual ao volume de um elipsóide com três eixos perpendiculares entre si a, b e c e que o diâmetro da esfera circunscrita é igual ao maior eixo do elipsóide, esfericidade é dada por:

$$\begin{aligned} \text{Esfericidade} &= \left(\frac{\text{volume do sólido}}{\text{volume da esfera circunscrita}} \right)^{1/3} = \\ &= \left[\frac{(n/6) \cdot a \cdot b \cdot c}{(n/6) \cdot a^3} \right]^{1/3} = \left(\frac{b \cdot c}{a^2} \right)^{1/3} = \\ &= \frac{\text{média geométrica dos diâmetros}}{\text{diâmetro maior}} = \\ &= \frac{(a \cdot b \cdot c)^{1/3}}{a} \end{aligned} \quad (07)$$

Onde: a => Maior eixo;

b => Maior eixo perpendicular a a;

c => Maior eixo perpendicular a a e b.

onde as interseções dos três eixos não estão necessariamente sobre um ponto comum.

Outra definição proposta por CURRAY (1951) é dada pela fórmula:

$$\text{Esfericidade} = d_i / d_e \quad (08)$$

Onde: d_i => Diâmetro da maior circunferência inscrita;

d_e => Diâmetro da maior circunferência circunscrita;

CAVALCANTI MATA *et alii* (1986) sugere para a determinação do grau de esfericidade de grãos a seguinte relação:

$$\text{Grau de esfericidade} = V_{obj}/V_{esf} \quad (09)$$

Onde: V_{obj} => Volume do grão;

V_{esf} => Volume da menor esfera que circunscribe o grão.

2.4 - Massa específica

De acordo com MOHSENIN (1980) existem atualmente três tipos de determinação de massa específica para materiais biológicos:

- Massa específica volumétrica - refere-se a massa de unidades individuais intactas do material, colocadas em um dado volume. Este método inclui o espaço poroso da massa de material. Cita como exemplo o valor da massa específica de um volume de milho em grãos no interior de um silo, com um teor de umidade conhecido.

- Massa específica aparente - refere-se ao peso de cada unidade intacta do material dividido pelo volume da unidade. Este tipo de determinação inclui o espaço poroso dentro de cada unidade do material. Como exemplo, apresenta o valor da massa específica de cada grão de milho do silo acima citado, que é cerca de

duas vezes maior que aquele obtido para a massa específica volumétrica.

- Massa específica verdadeira - é dada pela relação entre a massa e a unidade de volume dos sólidos dentro de cada unidade do material. Exemplifica o caso de milho moído em partículas com tamanho médio de 300 microns, com o espaço poroso do volume ocupado pela amostra determinado pelo método do picnômetro de comparação a ar e deduzido do volume total. A relação entre a massa e o volume líquido dá a massa específica verdadeira que é cerca de 20 vezes maior que a massa específica aparente do exemplo anterior.

2.5 - Calor específico

SIEBEL (1892) propôs que o calor específico de produtos alimentícios tais como carne, ovos, frutas e vegetais pode ser tomado como a soma do calor específico da água e dos sólidos em combinação com a água. Aplicando este princípio para soluções de cloreto de sódio a várias concentrações, estendeu sua validade para materiais biológicos com alto conteúdo de água. Considerando que o calor específico da água congelada está em torno da metade do calor específico da água líquida, sugeriu as fórmulas empíricas seguintes:

$$c = 0,008M + 0,20 \quad (10)$$

para temperaturas acima do ponto de congelamento.

Onde: $c \Rightarrow$ Calor específico do produto;

M => conteúdo de água presente.

e

$$c = 0,003M + 0,20 \quad (11)$$

para temperaturas abaixo do ponto de congelamento.

STITT & KENNEDY (1945) recomendam que a constante M seja assumida igual a 0,45 para temperaturas entre 25°C e 65°C e 0,32 para a faixa de 0°C a 25°C quando do uso da equação (10) no caso de vegetais desidratados.

Caso o conceito de SIEBEL (1892) fosse exato, o calor específico dos materiais biológicos não seria diferente da soma do calor específico da matéria seca e o calor específico da água, como sempre ocorre. FREEMAN (1943) alega que a razão desta diferença é a presença da água de constituição, não considerada por SIEBEL (1892). Tal posição não é compartilhada por outros pesquisadores (STITT & KENNEDY, 1945).

Existem vários métodos para determinação experimental do calor específico de produtos agrícolas. Alguns deles, de acordo com MOHSENIN (1980) são descritos a seguir:

- Métodos das misturas - neste método a amostra com massa e temperatura conhecidas é colocada em um calorímetro com calor específico previamente determinado contendo água cuja massa e temperatura são também conhecidas. O calor específico da amostra é calculado da equação do balanço de calor entre o calor ganho ou perdido pelo calorímetro e a água e aquele absorvido ou

perdido pela amostra.

A equação de balanço de calor usada segue a forma:

$$C_e W_e (t_i - t_e) + C_s W_s (t_i - t_e) = C_w W_w (t_e - t_w) \quad (12)$$

ou

$$C_s = (C_w W_w (t_e - t_w) - C_e W_e (t_i - t_e)) / W_s (t_i - t_e) \quad (13)$$

Onde: C_s => Calor específico da amostra;

C_w => Calor específico da água;

W_w => Peso da água adicionada;

t_e => Temperatura de equilíbrio;

t_w => Temperatura inicial da água;

C_c => Calor específico do calorímetro;

W_c => Peso do calorímetro;

t_i => Temperatura inicial da amostra;

W_s => Peso da amostra.

TURREL & PERRY (1957) usando o método das misturas para determinação do calor específico de citrus, obtiveram um valor médio de 0,87 cal/g°C.

FRECHETTE & ZAHRADNIK (1966) determinando o calor específico de maçãs pelo mesmo método obtiveram o valor de 0,90 cal/g°C.

- Método das placas - neste método o espécime é envolvido em placas térmicas aquecidas eletricamente. Estas placas são mantidas à mesma temperatura da amostra, que também é aquecida eletricamente. Desta forma, teoricamente não existem perdas de

calor. Assim, o calor cedido ao produto em um dado tempo é igual ao calor ganho pelo mesmo, como mostra a expressão:

$$Q = cwt = VIt \quad (14)$$

Onde: c => Calor específico do produto;

V => Tensão elétrica média aplicada;

I => Corrente transferida no intervalo de tempo;

t => Tempo transcorrido;

w => Peso da amostra;

T => Diferença entre as temperaturas inicial e final da amostra.

2.6 - Resfriamento de frutas

MAXI *et alii* (1967) estudando os problemas de deterioração em frutas e vegetais constatou que os tecidos destes produtos permaneciam vivos e os seus processos vitais não sofriam interrupção após as colheitas. Afirma o autor que estes processos podem ser controlados até certo ponto por altas umidades relativas e baixas temperaturas, que reduzem as perdas de umidade, a atividade enzimática e dos microorganismos que provocam diminuição do tempo de armazenagem.

Segundo GUILLOU (1958) o resfriamento de frutas retarda os processos fisiológicos de respiração, tornando o amadurecimento mais lento e diminuindo a depreciação de origem bacteriológica.

SHOWALTER & GRYERSON (1970) definem a respiração como o

processo básico vital no qual o alimento é convertido em dióxido de carbono, água e energia. Cada fruta possui em sua estrutura uma certa quantidade de alimento estocado na ocasião da colheita e sua vida aproveitável se acaba quando este alimento se esgota. Os autores apontam a temperatura como o fator preponderante que afeta a taxa de respiração e recomendam a refrigeração como um meio de prolongar a vida destes produtos.

Além da respiração, a excessiva perda de água no produto pode causar o comprometimento da qualidade das frutas, tornando-as enrugadas, com colorações opacas, pouco firmes ou flácidas (PANTÁSTICO, 1975).

A perda de água tem efeitos marcantes sobre a fisiologia dos tecidos vegetais, antecipando a maturação e a senescência de frutas tropicais (YANG & HOFFMAN *et alii*, 1984).

Transpiração é o termo biológico aplicado a evaporação da água dos tecidos vegetais através das estruturas anatômicas das frutas como estômatos, lenticelas, cutículas, pedúnculos e regiões de inserção do pedúnculo no fruto (NELSON, 1979).

A grande maioria das espécies de frutas contém de 75 a 95% de água e a umidade relativa dos espaços intercelulares é muito próxima de 100% . Portanto a tendência é quase sempre de o vapor d'água escapar dos tecidos, uma vez que a umidade relativa do ambiente é usualmente menor do que 100% (MITCHELL *et alii*, 1972).

HARDENBURG *et alii* (1986) afirmam que nas frutas tropicais sujeitas a altas temperaturas ambientais, inclusive aquecimentos adicionais pela exposição direta ao sol, o efeito da transpiração pode ser reduzido drasticamente por meio do resfriamento logo após a colheita.

PARSONS *et alii* (1972) defendem o resfriamento imediato após a colheita e a manutenção sob baixas temperaturas como essencial para o sucesso comercial de frutas frescas.

Frutas e vegetais deterioram em uma hora a 32°C o mesmo que em um dia a 10°C ou em uma semana a 0°C (GUILLOU, 1958).

Produtos sensíveis, colhidos em temperatura ambiente alta, podem respirar 20 ou 30 vezes mais rápido que aqueles armazenados sob temperatura ótima de armazenagem. O resfriamento rápido logo após a colheita garante a qualidade e é uma garantia contra perdas e deterioração (GUILLOU, 1963).

KADER (1979) afirma que as taxas de reações químicas governadas pela lei de Vant'Hoff, aumentam de 2 a 3 vezes a cada aumento de 10°C devido a ação catalítica de enzimas presentes no produto.

ECKERT & SOMMER, (1967) estabelecem que o controle da temperatura é tão importante que o tratamento com fungicidas pode ser considerado como um suplemento da refrigeração.

Quanto mais baixa for a temperatura tanto mais reduzida será a ação química, enzimática e o crescimento microbiano e uma

temperatura suficientemente baixa inibirá o crescimento de todos os microorganismos (GAVA, 1979).

Segundo BENNETT (1964), os três métodos de pré-resfriamento de frutas mais largamente empregados são o resfriamento a vácuo, a água e a ar. Destes, o sistema a ar apresenta as seguintes vantagens: limpeza, abundância, facilidade de manuseio, facilidade para adaptação e menor propensão a causar danos fisiológicos nos alimentos.

Devido a lentidão do resfriamento por convecção natural, o processo comercial é normalmente levado a efeito com circulação forçada do ar através do produto.

Resfriamento a ar forçado combina resfriamento rápido com pouco desperdício de frio (GUILLOU, 1958).

KUSHMAN & BALLINGER (1962), resfriando amoras em containers de fibra plástica usando um fluxo de ar de 0,9 cfm por 0,5 l de fruta obteve um meio tempo de resfriamento de 110 minutos. Incrementando o fluxo para 1,7 e 3,5 cfm por 0,5 l, o meio tempo de resfriamento foi reduzido para 62 e 43 minutos, respectivamente.

GUILLOU (1960) resfriando uvas com ar forçado através do produto, reduziu a metade a diferença entre temperatura da câmara e a temperatura inicial do produto (meio tempo de resfriamento) em 1,3 horas, enquanto que usando convecção natural foram gastas 7 horas.

BENNETT *et alli* (1966) resfriando citrus em caixas de 42 polegadas de lado por 26 polegadas de altura com ar forçado e uma vazão de 11.500 cfm concluiu que 75% do calor disponível em laranjas de tamanho médio e citrus similares e 65% do calor disponível em grapefruits e citrus similares podem ser extraídos em 1,0 hora. Os autores não fazem referência quanto a velocidade do ar passando através do produto.

2.7 - Parâmetros físicos ligados a transferência de calor

2.7.1 - Condutividade térmica (K)

STALHANE & PYK (1931) utilizaram o método da fonte linear de calor para medição de condutividade térmica em regimes transientes que se aplica, comumente, para materiais granulares. Consiste de uma fonte de calor em um sólido considerado de comprimento infinito e diâmetro infinitesimal tal como um fio delgado. Mergulhando a fonte de calor no material que se deseja medir a condutividade térmica e energizando-a, tem-se um aumento de temperatura, que é medido a uma certa distância e após um certo intervalo de tempo. A condutividade térmica é então determinada em função do aumento de temperatura do produto pela equação seguinte:

$$K = \frac{Q}{4n (T_2 - T_1)} \ln \frac{t_2}{t_1} \quad (15)$$

Onde: Q => Quantidade de calor cedida ao produto;

T₁ => Temperatura inicial do produto;

T₂ => Temperatura final do produto;

$t_1 \Rightarrow$ Tempo inicial;

$t_2 \Rightarrow$ Tempo final.

PFLUG *et alii* (1965), afirmam que a condutividade térmica é das mais arditosas e variáveis propriedades. Diferenças na estrutura e variações normais em sistemas biológicos complicam ainda mais a avaliação da condutividade térmica nestes sistemas. Os autores citando Andersen, apresentam a equação:

$$K_{\text{produto}} = [K_{\text{água}} (\% \text{água}) + (100 - \% \text{água}) K_{\text{sólidos}}] / 100 \quad (16)$$

mas não aconselham o uso desta fórmula para materiais celulares, que contêm ar nos espaços intercelulares. Para esses materiais sugerem a equação de Euchen para partículas esféricas dispersas em fase contínua:

$$K = K_c \left[\frac{1 - [1 - C_k (K_d / K_c)]}{1 + (C_k + 1) C_d} C_d \right] \quad (17)$$

Onde: $K_c \Rightarrow$ Condutividade térmica do meio;

$C_k \Rightarrow$ Concentração do meio;

$K_d \Rightarrow$ Condutividade térmica da fase dispersa;

$C_d \Rightarrow$ Concentração da fase dispersa.

Nesta fórmula, o ar pode ser considerado como a fase dispersa em frutas e produtos vegetais.

FITCH (1935) desenvolveu um método para medição da condutividade térmica em processos transientes para maus condutores térmicos. Consiste basicamente de um recipiente de cobre, termicamente isolado nas laterais que contém um líquido destinado

a manter a temperatura constante e um sorvedouro contendo uma rolha de cobre isolada. Dois termopares de cobre-constantan são usados, sendo um, na base da fonte e outro, embutido na rolha de cobre. Uma fatia do produto com menos de 1,0 centímetro de espessura é colocada entre a fonte e o sorvedouro e as temperaturas, após o início do processo de medição da condutividade térmica, são obtidas da leitura das correntes elétricas medidas por um galvanômetro ligado aos termopares. Com os valores de tempo e temperatura, usa-se a equação:

$$K = 2,303 \frac{M.C.L}{A} \frac{\log (I_1/I_2)}{t} \quad (18)$$

Onde: K => Condutividade térmica do produto;

M e C => Massa e calor específico do sorvedouro de calor;

I₁ e I₂ => Diferenças de temperatura entre o começo e o fim da medição em termos de leitura de corrente com o galvanômetro;

t => Tempo de medição;

A e L => Área e espessura do produto, respectivamente.

Plotando os valores de corrente sobre a escala logarítmica de um papel mono-log e o tempo sobre o eixo linear das ordenadas, a inclinação da porção reta da curva resultante é igualada a KA/2,3 M.C.L para determinação da condutividade térmica.

BENNET *et alii* (1964) usaram uma versão modificada do aparelho de Fitch para medição da condutividade térmica em citrus, cortados em amostras com formato cilíndrico.

2.7.2 - Difusividade térmica (a)

DICKERSON & READ (1973) afirmam que a difusividade térmica é a medida da quantidade de calor absorvido (dC_p) por um material para uma dada mudança de temperatura e além disso indica a habilidade do material para conduzir calor (K) para moléculas adjacentes.

Afirmam ainda que para alimentos com alto conteúdo de água, a difusividade pode ser avaliada em um valor 10% inferior ao valor da difusividade da água à mesma temperatura e que se a difusividade térmica de uma amostra for levada à metade, o tempo de resfriamento será incrementado por um fator de 2, ou seja, $t_2 = t_1 (a_1 / a_2)$ onde t é o tempo e a é a difusividade térmica. Os índices 1 e 2 referem-se a dois diferentes testes.

DICKERSON (1965) desenvolveu um medidor de difusividade térmica em alimentos. O medidor consiste em um cilindro com alta condutividade térmica e difusividade térmica determinada, imerso em um recipiente contendo água aquecida e agitada. No interior do cilindro é colocada a amostra que se deseja medir a difusividade térmica. Dois termopares são usados, sendo um no interior da amostra e o outro na superfície externa do cilindro. No momento em que o cilindro é colocado no recipiente, observa-se os registros de temperatura dos termopares, até o momento em que os mes-

mos indiquem um acréscimo de temperatura a uma taxa constante, quando então pode ser aplicada a lei de Fourier para o caso em que se verifica um gradiente de temperatura apenas no sentido radial:

$$\frac{A}{a} = \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \quad (19)$$

Com $r = 0$ no centro da amostra e em condições de fronteira conveniente, tem-se a solução:

$$a = \frac{A R^2}{4 (T_s - T_c)} \quad (20)$$

Onde: a => Difusividade térmica;

A => Taxa de elevação de temperatura no cilindro;

R => Raio do cilindro;

T_s => Temperatura na superfície do cilindro;

T_c => Temperatura no centro do cilindro.

Segundo GAFFNEY *et alli* (1980) os valores de difusividade térmica variam consideravelmente para um dado produto com diferenças de 25% ou mais para produtos com alto teor de umidade. Acima de 25% para toranja, 78% para batata doce e 93% para maçãs. Essas discrepâncias manifestam-se nas medições para um mesmo produto por diferentes pesquisadores e não para vários produtos por um mesmo pesquisador, o que indica que as suas causas estão nas técnicas empregadas na medição da difusividade térmica no estado transiente.

Os autores obtiveram na medição da difusividade térmica de vários frutos e vegetais valores na faixa de 20 a 30% inferiores ao da água.

BHOWMIK & HAYAKAWA (1979), afirmam que a difusividade térmica é necessária na determinação das curvas de temperatura de alimentos durante processos de transferência de calor para a delimitação dos próprios procedimentos usados nestas operações.

2.7.3 - Coeficiente de filme (h)

De acordo com ARCE & SWEAT (1980), os fatores que afetam o coeficiente de filme não se encontram no interior do objeto resfriado, mas na camada limite do fluido que envolve o corpo. Esta camada limite é grandemente afetada pela dinâmica do fluido circundante e as condições superficiais do corpo. Superfície rugosa, embalagem, etc., afetam o regime do fluxo em torno do corpo influenciando no valor do coeficiente de filme. Esta dependência do coeficiente de filme da velocidade do fluido que responde pela transferência de calor faz com que os pesquisadores representem o coeficiente de filme em termos de número de Nusselt (Nu) como função do número de Reynolds (Re) e do número de Prandtl (Pr). Estas correlações são utilizadas em determinações precisas do coeficiente de filme para geometrias simples tais como placas planas.

CLARY & NELSON (1968) afirmam que a rugosidade superficial tem pequeno efeito sobre a taxa de transferência de calor ao longo da camada limite que permanece laminar. Para camadas

turbulentas, no entanto, o efeito não é desprezível.

ARCE & SWEAT (1980) afirmam que existe uma fraca dependência entre o coeficiente de filme e a temperatura do corpo e do meio de tal maneira que apenas para medições onde se deseje grande precisão, tais temperaturas devem ser acompanhadas com rigor. Os autores afirmam ainda que todos os valores de coeficiente de filme disponíveis na literatura são valores médios, entretanto, o valor local do coeficiente de filme varia com a posição do objeto. Para algumas aplicações esta variação pode ser significativa. Outra imprecisão reside na falta de padronização nas medições da velocidade do meio. É provável que a velocidade varie em muitos dos casos citados na literatura. Além disso não se dispõe de uma uniformidade na estimação de erros experimentais para o cálculo do coeficiente de filme, o que torna difícil a avaliação da precisão dos dados.

Segundo BAIRD & GAFNEY (1976) valores de coeficiente de filme determinados, diferem em até mais de 200% para um conjunto específico de condições. Apontaram também que um método comum de determinar o coeficiente de filme é através de parâmetros adimensionais, Nu e Re .

PFLUG *et alii* (1965) constataram que o coeficiente de filme afeta a taxa de resfriamento f , bem como o fator de atraso J . Conhecendo-se o coeficiente de filme, pode-se usá-lo para desenvolver curvas de resfriamento, para comparar dados de resfriamento de produtos e para analisar dados de resfriamento em propriedades físicas de produtos.

MCADAMS (1954) desenvolveu uma série de equações para cálculo do coeficiente de filme, para objetos cuja forma geométrica, aproxime-se da forma cilíndrica ou esférica e o meio de transferência de calor seja ar ou água. Estas equações exigem o conhecimento da condutividade térmica do fluido, do diâmetro do objeto e do número de Reynolds, além do número de Prandtl em algumas delas.

SRINIVASA MURTHY *et alli* (1976) estudando transferência de calor em alimentos propôs o cálculo do coeficiente de filme baseado sobre o diâmetro perpendicular ao fluxo de água passando através de modelos de maçãs a partir da fórmula de Kramer:

$$hD/K_f = 2,0 + 1,3 (Pr)^{0,15} + 0,66 (Pr)^{0,31} (Re)^{0,5} \quad (21)$$

Onde: D = Diâmetro do objeto;

K_f = Condutividade térmica do fluido =

= 0,343 Btu-ft por sq ft-hr-deg °F;

$Pr = C_p/K_f = 12,54$ para água a 33 °F;

C_p = Calor específico do produto;

$$h = \frac{1,338 + 0,496 (Re)^{0,5}}{D} \quad (22)$$

Calcula-se $2K/4D_e$ onde D_e é o diâmetro de uma esfera de área superficial equivalente.

SMITH *et alli* (1967) propôs um método para análise dos processos de transferência de calor que utiliza conceitos geométricos. Formas geométricas irregulares são representadas pelo

autor por elipsóides genéricos e foi definido o índice geométrico G que se representa por:

$$G = \frac{1}{4} + \frac{3}{8A^2} + \frac{3}{8B^2} \quad (23)$$

Onde A e B relacionam duas áreas seccionais ortogonais do objeto com elipses de mesma área. Do valor de G tem-se:

$M_1^2 = G n^2$ onde M_1^2 é a primeira raiz da equação transcendental aplicável à geometria do objeto.

Os autores estabeleceram a relação entre M_1^2 , G e número de Biot (NB_i) construindo um gráfico. A partir daí com o valor de NB_i obtiveram o coeficiente de filme.

2.7.4 - O fator f e taxa de resfriamento (TR)

PFLUG *et alii* (1965) estabelecem, referindo-se ao processo de resfriamento de um objeto, que ao plotar a curva do logaritmo da diferença entre a temperatura do objeto e a temperatura do meio versus o tempo, tem-se a "função direção" f que é o tempo necessário para a diferença de temperatura entre o objeto e o meio resfriante cair em 90% ou, graficamente, o tempo necessário para a porção linear da curva transpor um ciclo logarítmico completo. Se o gradiente de temperatura no interior do objeto é desprezível, a taxa de resfriamento TR será diretamente proporcional ao calor específico (C_p) e a massa específica (d) e inversamente proporcional ao coeficiente de filme.

BHOWMIK E HAYAKAWA (1979) conceituam que o fator f representa o índice de inclinação da porção linear da curva de temperatura do objeto.

DICKERSON & READ (1973) esclarecem que com o valor do fator de inclinação, pode-se prever o valor de temperaturas para qualquer tempo durante o resfriamento. Se os dados forem plotados na forma de temperatura adimensional como função de at/S^2 , onde a = difusividade térmica, t = tempo e S = raio da amostra. As temperaturas podem ser determinadas não apenas como função do tempo, mas também como função da geometria, da difusividade térmica, da temperatura inicial do produto e da temperatura do meio.

OLSON & JACKSON (1942) mostraram relações entre o fator f e a difusividade térmica de vários objetos com diferentes configurações geométricas, assumindo valores infinitamente grandes para o coeficiente de filme.

SOULE *et alii* (1966) resfriando citrus observaram que a taxa de resfriamento, está diretamente relacionada ao tamanho do fruto e à temperatura inicial do mesmo.

O'BRIEN & GENTRY (1967) afirmam que os fatores que influenciam a taxa de resfriamento em câmaras de resfriamento são: a temperatura de resfriamento, a quantidade de ar que atravessa os containers, as aberturas e os materiais dos containers, a razão entre o volume e a superfície dos frutos, o arranjo dos frutos no interior dos containers, a condutividade térmica, a difusividade térmica dos frutos e o arranjo dos containers.

KOPELMAN *et alii* (1966) resfriando maçãs em ar, constataram que o valor do fator de inclinação decresceu 50% com a mudança na velocidade do ar de 75 para 1000 fpm. Detectaram ainda que um incremento no tamanho dos frutos tem um efeito mais pronunciado sobre o valor do fator de inclinação para condições de moderado a alto coeficiente de filme, tal como a altas velocidades do ar, do que para baixos coeficientes de filme. Para corpos esféricos o valor do fator de inclinação para grandes NB_i ou altos coeficientes de filme é proporcional a $D^{2,5}$ (diâmetro do fruto) e $D^{1,45}$ para baixos NB_i . Entretanto, apontam valores teóricos de $D^{2,0}$ quando NB_i tende a infinito e $D^{1,0}$ quando NB_i tende a zero.

LENTZ & BERG (1977) observaram que um incremento de 40 a 50 cm/s na velocidade de movimentação de ar em resfriamento de repolhos aumentou a taxa de resfriamento em 5 a 10%. A taxa de resfriamento para repolhos expostos em caixas esteve em torno da metade daquela obtida para repolhos individualmente. Os autores atribuem essa diferença à redução do fluxo de ar em torno das unidades devido ao contato da sua superfície com a caixa e de uns com os outros e afirmam que a circulação forçada de ar através das caixas seria necessária para a obtenção de resultados semelhantes aqueles observados em repolhos isolados.

2.7.5 - Meio tempo de resfriamento (Z)

GUILLOU (1958) definiu um parâmetro matemático relacionado com a taxa de resfriamento muito aceito por pesquisadores

que é o tempo no qual a diferença de temperatura entre o objeto e o meio é reduzida pela metade. Expresso geralmente em horas ou minutos este tempo é referido como o intervalo necessário para resfriar o produto comercialmente e pode ser representado por Z , $2Z$ ou $3Z$ conforme represente a diferença de temperatura entre o produto e o meio pela metade de um quarto ou um oitavo da diferença inicial de temperatura.

PFLUG & BLAISDELL (1963) informam que normalmente escolhe-se ou o fator f ou o fator Z conforme a conveniência, para a construção de curvas de resfriamento. A indústria de alimentos usa amplamente o fator f , representando o tempo para uma redução de 90% na temperatura do objeto e alguns pesquisadores preferem o uso do fator Z (KUSHMAN, 1962).

SPAGNOL (1989) relaciona o meio tempo de resfriamento (Z) com a taxa de resfriamento (TR) e o fator de atraso (J):

$$Z = \frac{\ln(2J)}{TR} \quad (24)$$

2.7.6 - Fator de atraso (J)

Na citação de BHOWMIK & HAYAKAWA (1979) o fator J representa o coeficiente de intersecção com o eixo de temperaturas da porção linear da curva de resfriamento do corpo, tendo sido introduzido por BALL (1923).

Entretanto, a avaliação de J pelo método gráfico é geralmente pouco precisa, a menos que a curva de resfriamento

apresente uma porção favoravelmente reta. Quando a forma do objeto não é exatamente definida, o traçado da linha reta torna-se mais sujeito a imprecisões e qualquer variação no traçado da linha causa pequenas variações no valor de f , porém, grandes variações no valor de J . Também, quaisquer erros na colocação do termopar ou provocados por problemas de condução tem pequena influência sobre o valor de f , mas um efeito crítico sobre o valor de J . Desta forma, J pode ser usado para o cálculo de NB_i , entretanto o NB_i calculado usando o valor de f é mais confiável (KOPELMAN *et alli*, 1966).

Dispondo-se dos valores do fator J , juntamente com os valores do fator f , é possível descrever a curva de resfriamento de um objeto representada em gráfico monolog para tempos grandes, quando a curva coincide com uma assíntota de linha reta (SPAGNOL, 1989).

2.8 - Equações aplicadas ao resfriamento

De acordo com GAFFNEY *et alli* (1985) um caso especial de resfriamento de um objeto sólido se dá quando a resistência à transferência de calor na sua superfície é alta quando comparada à resistência a condução interna, isto é, quando a condutividade térmica é alta em relação ao coeficiente de filme. Tal situação pode ocorrer quando se resfria objetos de alta condutividade térmica, como metais. Para frutas, que possuem baixa condutividade térmica, esta situação só ocorre em situações de resfriamento muito lento onde o h é muito pequeno. Sob estas condições o gradiente de temperatura no interior será desprezível e a temperatu-

ra em qualquer ponto do objeto em qualquer tempo não diferirá apreciavelmente da temperatura da superfície. Sob estas condições a energia necessária para alterar a temperatura do objeto pode ser descrita pela lei de Newton:

$$C_p \cdot dV \cdot dT/dt = h \cdot A \cdot (T_m - T) \quad (25)$$

Onde: C_p => Calor específico;

d => Massa específica;

V => Volume;

T => Temperatura do objeto;

t => Tempo;

h => Coeficiente de filme;

A => Área superficial;

T_m => Temperatura do meio;

Considerando que as propriedades térmicas não se alteram com a temperatura e a temperatura do meio permanece constante a Equação 25 pode ser integrada entre os tempos zero e t e as temperaturas inicial T_i e temperatura em qualquer ponto T resultando:

$$\frac{T - T_m}{T_i - T_m} = \exp(-h \cdot A / d \cdot C_p \cdot V)t \quad (26)$$

De acordo com ARCE & SWEAT (1980) esta solução só é válida para condutividades térmicas muito maiores que o coeficiente de filme, de maneira que NB_i seja menor que 0,1. Nos casos em que NB_i são maiores que 0,1 deve-se utilizar uma técnica que

considere o gradiente de temperatura da superfície ao centro do produto, situação em que a temperatura superficial se altera muito mais rápido que a temperatura interior. Se a condutividade térmica é constante no tempo a taxa de mudança de temperatura pode ser descrita pela lei de Fourier.

Considerando um corpo sem produção interna de calor, a equação de Fourier para transferência de calor em esferas em resfriamento sob temperatura do meio constante é dada por KOPELMAN *et alii* (1966):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (27)$$

Onde: $r \Rightarrow$ Raio do objeto.

que considera a transferência de calor unicamente em sentido radial com a condição inicial $T = T_i$ em $t = 0$ para todo r e as condições de contorno:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \text{ em } r = 0 \text{ e } t > 0$$

e

$$\frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{h}{K} (T - T_r) \text{ em } r = R \text{ e } t > 0$$

Onde: $T \Rightarrow$ Temperatura do objeto;

$t \Rightarrow$ Tempo;

$a \Rightarrow$ Difusividade térmica do objeto;

$r \Rightarrow$ Distância radial a partir do centro;

$T_i \Rightarrow$ Temperatura inicial do objeto;

- h => Coeficiente de filme;
 K => Condutividade térmica do objeto;
 T_r => Temperatura do meio;
 R => Raio do objeto.

PFLUG & BLAISDELL (1963) apresentaram a solução da Equação 27:

$$\frac{(T - T_r)}{(T_i - T_r)} = \sum_{i=1}^{\infty} 2 \frac{\text{sen } M_i - M_i \text{ cos } M_i}{M_i - \text{sen } M_i \text{ cos } M_i} \exp(-M_i^2 at/R^2) \frac{\text{sen } M_i r/R}{M_i r/R} \quad (28)$$

Onde M_i são as raízes da equação característica. Segundo Ball e Olson, citados pelos autores, as raízes M_i estão relacionados com NB_i pela fórmula $NB_i = 1 - M_i \cot M_i$

No centro do objeto: $r = 0$ e a Eq. 28 simplifica-se:

$$\frac{(T - T_r)}{(T_i - T_r)} = \sum_{i=1}^{\infty} 2 \frac{\text{sen } M_i - M_i \text{ cos } M_i}{M_i - \text{sen } M_i \text{ cos } M_i} \exp(-M_i^2 at/R^2) \quad (29)$$

Quando a série representada pela Equação 29 converge suficientemente rápido, todos os termos após o primeiro tornam-se desprezíveis e o resultado conduz à solução obtida por Airton e Perry citados por MOHSENIN (1980) em que se tem uma curva logarítmica simples da forma:

$$\frac{(T - T_r)}{(T_i - T_r)} = J \exp(-1/f)t \quad (30)$$

Onde:

$$J = 2 \frac{\text{sen } M_1 - M_1 \cdot \text{cos } M_1}{M_1 - \text{sen } M_1 \cdot \text{cos } M_1} \quad (31)$$

e

$$\frac{1}{f} = \frac{M_1^2 \cdot a}{R^2} \quad (32)$$

Onde J e $1/f$ representam respectivamente o fator de atraso e a taxa de resfriamento do objeto, obtida da inclinação da porção reta da curva de resfriamento.

GURNEY & LURIE (1923), WILLIAMSON & ADAMS (1919), HEISLER (1947) e SCHNEIDER (1963) propuseram soluções gráficas para as Equações 28 e 29.

No caso de aquecimento ou resfriamento de alimentos e produtos agrícolas o coeficiente de filme é muito maior que a condutividade térmica, de maneira que a variação superficial da temperatura é muito mais rápida que a variação de temperatura no interior do produto, existindo um apreciável gradiente (MOHSEIN, 1980). Assim, a razão k/hr aproxima-se de zero, condição que torna viável o uso das cartas de GURNEY & LURIE (1923), WILLIAMSON & ADAMS (1919) ou outras. Destas cartas obtêm-se os valores de condutividade e difusividade térmicas a partir da definição do número de Fourier (Fo):

$$Fo = Kt/d \cdot c \cdot R^2 \text{ ou } Fo = at/R^2 \quad (33)$$

Onde: $t \Rightarrow$ Tempo de duração do processo;

$d \Rightarrow$ Massa específica do produto;

$c \Rightarrow$ Calor específico do produto;

$R \Rightarrow$ raio do produto;

$a \Rightarrow$ difusividade térmica do produto.

Para a determinação do coeficiente de filme McADAMS (1954) propôs uma série de equações para os casos de cilindros e esferas imersos em água ou ar. Estas equações se apresentam em termos dos números de Reynolds, Nusselt ou Prandtl. No caso de transferência de calor entre esferas e o ar tem-se

$$hD/k_f = 0,37(R_e)^{0,6} \quad (34)$$

Onde: $D \Rightarrow$ Diâmetro da esfera;

$k_f \Rightarrow$ Condutividade térmica do ar.

GROEBER *et alii* (1961), constatando que para números de Reynolds menores que 17 a equação acima não satisfazia, sugeriu uma nova forma:

$$hD/k_f = 2 + 0,33(R_e)^{0,5} \quad (35)$$

e para o ar sem movimento:

$$hD/k_f = 2 \quad (36)$$

Nestes casos, a determinação de h depende apenas dos valores da condutividade térmica e da viscosidade do ar na temperatura utilizada no processo, do tempo de duração do processo e do diâmetro do objeto.

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no Núcleo de Tecnologia em Armazenagem utilizando as dependências do Laboratório de Processamento e Armazenagem de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola, ambos do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

Os umbus utilizados nos experimentos foram colhidos na localidade de Caiçara, 6,0 km a sudeste de Campina Grande, provenientes de um pomar espontâneo de cerca de 50 exemplares.

Dentre os frutos, foi dada preferência àqueles que apresentaram melhor aparência externa, com casca íntegra, sem furos, rachaduras ou manchas causadas por agentes agressivos.

A escolha quanto ao grau de maturação foi decidida a partir da preferência popular predominante, que recai sobre um produto meio maduro, que conserva geralmente a casca com cor verde e a polpa firme, porém tenra e estruturada, diferentemente do produto ainda verde, que tem a polpa rígida e ácida, ou do material plenamente maduro, que possui a casca amarelada e a polpa semi-líquida.

O material, após a colheita, foi acondicionado em sacos plásticos com capacidade para 20 litros e conduzido até as instalações do Laboratório de Processamento e Armazenagem de Produtos Agrícolas.

A determinação experimental do estágio de maturação foi feita com base na consistência da polpa mediante o emprego de um consistômetro segundo Höppler. A medida deste parâmetro foi feita aplicando-se uma carga de 500 gramas sobre o espécime através de uma ponta cônica cuja profundidade de penetração é lida em um mostrador analógico. A média das leituras para 50 exemplares testados foi considerada como um valor padrão da maturidade dos frutos.

Logo após, foi submetido a um processo de congelamento, distribuído em camada fina em uma câmara frigorífica a -18°C , com circulação forçada de ar. Após o congelamento, foi embalado em sacos plásticos comerciais e armazenado, para posteriormente ser, após descongelamento, utilizado nos ensaios de pré-resfriamento e no estudo das propriedades físicas.

Nos ensaios, os frutos eram descongelados e deixados à temperatura ambiente até atingirem o equilíbrio térmico com o meio. Em seguida, eram pesados e medidos nos três eixos principais antes de serem submetidos individualmente ao pré-resfriamento.

Para medições da temperatura de resfriamento no interior da câmara utilizou-se um medidor de temperatura do tipo termistor, colocado ao lado do fruto. Para as temperaturas no interior do fruto usou-se um termopar do tipo K (CHROMEL - ALUMEL) de diâmetro 0,8 mm. A porção do termopar colocada no ambiente da câmara foi totalmente revestido com isolante térmico (isopor), a fim de minimizar fenômenos de condução de calor ao longo

do mesmo.

Uma vez que a câmara não dispunha de sistema de circulação de ar, a ventilação forçada foi conseguida com o auxílio de uma ventoinha, à qual foi acoplado um tubo plástico, de maneira a direcionar o fluxo de ar na direção do fruto. A medição do ar resfriante sobre a amostra foi feita com um velômetro ALNOR 6000P.

3.1 - Determinação das propriedades físicas

DIMENSÕES

Para as medições de tamanho foi utilizado um paquímetro, com o qual foram feitas as medidas dos três eixos mutuamente perpendiculares.

VOLUME

A determinação do volume foi feita pelo método da balança de plataforma. A amostra, presa a um arame fino, foi totalmente mergulhada em um becker contendo água, colocado sobre o prato da balança. Do acréscimo de peso, resultante da massa de água deslocada dividido pela massa específica da água, obteve-se o volume do fruto.

CIRCULARIDADE

A circularidade foi determinada com o auxílio de um retroprojektor. O fruto, na posição natural de repouso, teve seus contornos projetados sobre papel milimetrado. Da relação entre a área projetada e a área do menor círculo que a circunscreveu foi definida a circularidade individual do produto.

ESFERICIDADE

A esfericidade foi obtida da relação entre o diâmetro da esfera de igual volume do fruto e o diâmetro do menor círculo circunscrito à área projetada do mesmo.

MASSA ESPECÍFICA

Da divisão da massa do produto pesado ao ar pelo seu volume calculou-se a massa específica.

CALOR ESPECÍFICO

Para a determinação do calor específico foi utilizado um calorímetro construído artesanalmente, consistindo em uma ampola de garrafa térmica de 1000 ml envolvida em uma camada de 5 cm de isolante térmico (lã de vidro) e tendo como invólucro um cilindro de PVC de 15 cm de diâmetro. Na rolha de borracha que serve de tampa para a ampola foi introduzida a haste de um termopar com precisão de $0,1^{\circ}\text{C}$, com o qual foram aferidas as temperaturas (Figura 01).

Foi usado o método das misturas para determinação do calor específico.

Inicialmente, determinou-se a capacidade calorífica do calorímetro da seguinte maneira:

- a) Colocou-se cerca de 100 gramas de água à temperatura ambiente no calorímetro;
- b) Fechou-se o aparelho e mediu-se a sua temperatura interna (T_1);



FIGURA 01 - Vista do calorímetro com medidor de temperatura.

- c) Acrescentou-se mais cerca de 100 gramas de água a uma temperatura em torno de 4°C (T₂);
- d) Agitou-se o calorímetro por 10 minutos para que a sua temperatura interna atingisse o equilíbrio (T₃);
- e) Utilizou-se o balanço de calor abaixo descrito:

$$c_1 m_1 (T_1 - T_3) + C_{ca1} (T_1 - T_3) = c_2 m_2 (T_3 - T_2) \quad (37)$$

Onde: c₁ e c₂ => Calor específico da água (cal/g°C);

m₁ => Massa de água à temperatura ambiente (g);

m₂ => Massa de água resfriada (g);

C_{ca1} => Capacidade calorífica do calorímetro (cal/°C).

Encontrou-se o calor específico do produto partindo do item (d) e acrescentando-se uma massa de 100 gramas do produto à temperatura T₄. Agitou-se e mediu-se a temperatura de equilíbrio (T₅). Usou-se então a fórmula:

$$m_p c_p (T_4 - T_5) = c_1 m_1 (T_5 - T_3) + C_{ca1} (T_5 - T_3) \quad (38)$$

Onde: m_p => Massa do produto;

c_p => Calor específico do produto (cal/g°C).

3.2 - Pré-resfriamento

Para cada temperatura estudada, um fruto individual, em equilíbrio com a temperatura ambiente, foi submetido ao resfriamento a ar forçado a uma velocidade de 2,8 m/s. As temperaturas utilizadas foram de -20,3°C ± 0,3°C; -17,0°C ± 1,5°C; -15,5°C ± 1,0°C; -13,6°C ± 1,0°C; -11,9°C ± 0,8°C e -9,8°C ± 0,8 °C. A

medição de temperatura foi efetuada com a introdução de um termopar na polpa junto a semente, colocado na região equatorial do fruto (perpendicular ao eixo de inserção do pedúnculo), como se vê na Figura 02. O acompanhamento do processo foi feito com registros de temperatura a cada minuto e foi dado por encerrado com o termopar indicando valores próximos a 5°C, temperatura comumente empregada em armazenamento refrigerado de frutas.

Em cada temperatura fez-se o pré-resfriamento com pelo menos 5 repetições e as análises de pré-resfriamento foram feitas sobre as médias de tempo e de temperatura das repetições, desconsiderando-se os primeiros dados de tempo X temperatura que representam os tempos iniciais, da seguinte maneira:

- à -20,3°C desprezou-se os dados para o tempo zero;
- 17,0°C desprezou-se os três primeiros dados;
- 15,5°C desprezou-se os dados para o tempo zero;
- 13,6°C desprezou-se os dois primeiros dados;
- 11,9°C desprezou-se o tempo zero;
- 9,8°C desprezou-se os dois primeiros dados.

As curvas de resfriamento (temperatura X tempo) foram plotadas em gráfico mono-log, com os tempos em minutos grafados no eixo linear das abscissas e as temperaturas adimensionais grafadas no eixo logarítmico das ordenadas.

Para cada temperatura de resfriamento construiu-se uma curva média, calculando-se a média aritmética dos tempos e das temperaturas correspondentes, obtendo-se seis curvas médias, apresentadas uma a uma.

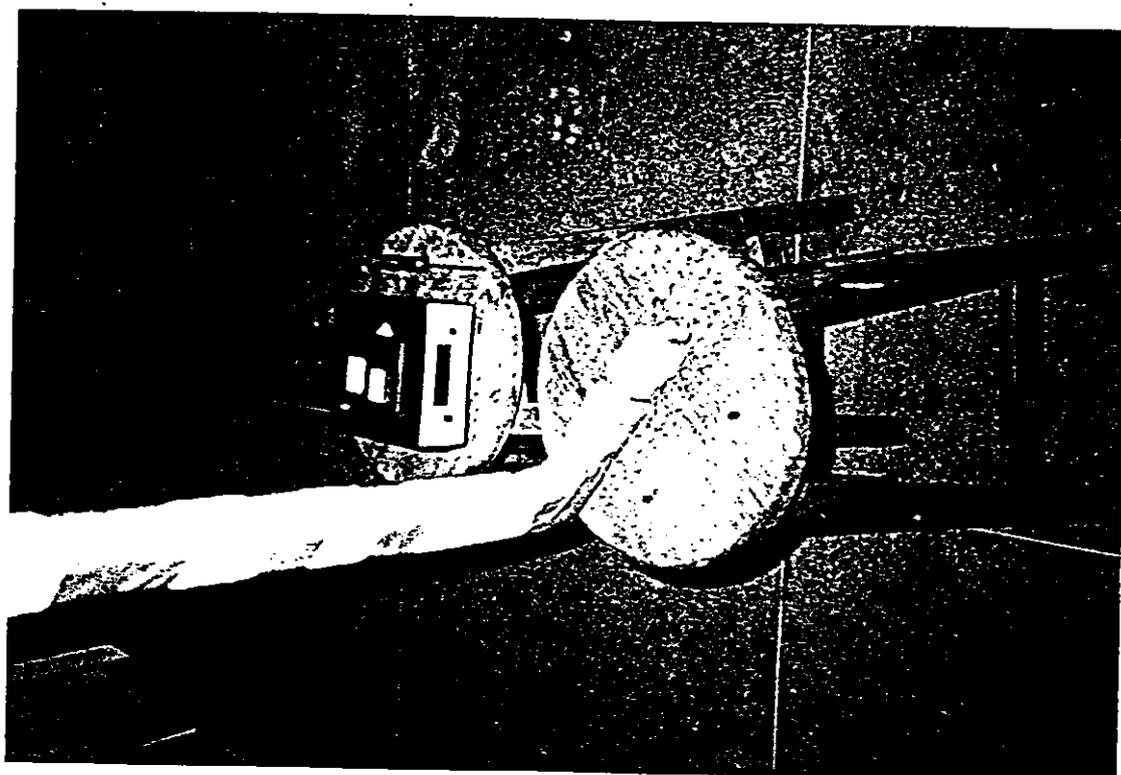
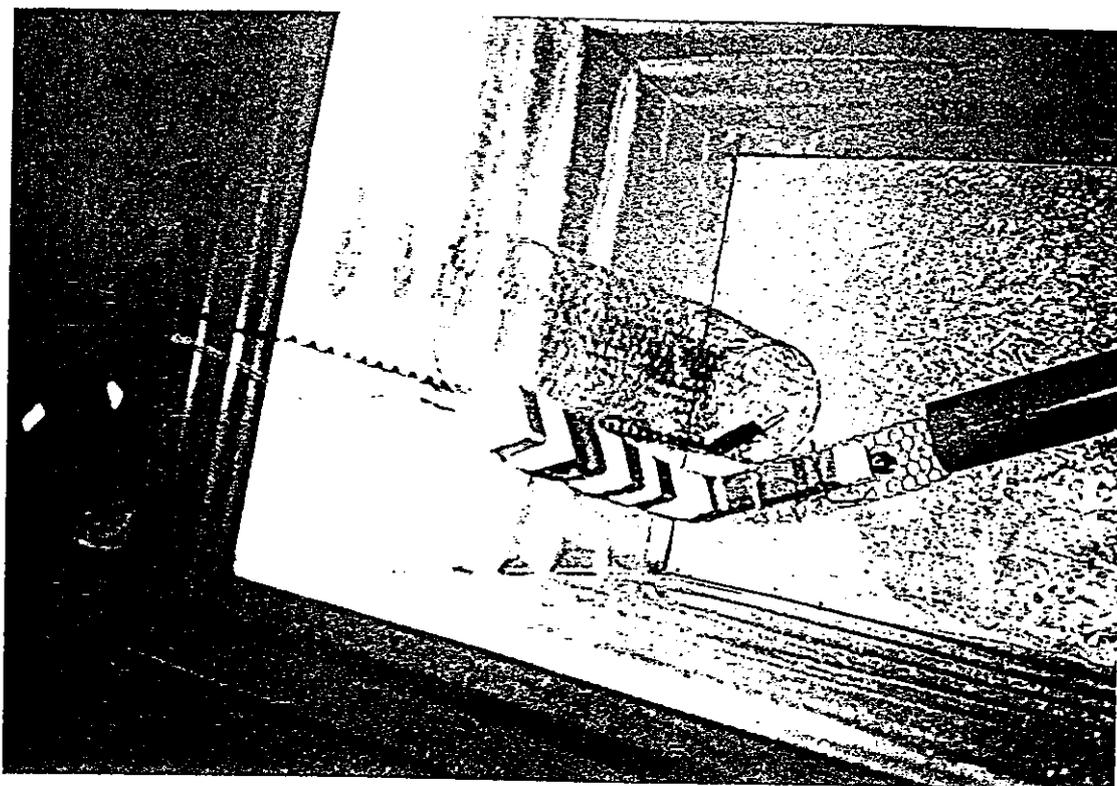


FIGURA 02 - Vistas da montagem experimental no interior da câmara de resfriamento e externamente com o medidor de temperatura da câmara.

Para efeito comparativo, as seis curvas médias referidas acima também foram plotadas juntas em um único sistema de eixos (FIGURA 01).

3.2.1 - Determinação dos parâmetros envolvidos no resfriamento

COEFICIENTE DE FILME (h)

No cálculo do coeficiente de filme utilizou-se os valores médios de raio e diâmetro dos frutos usados nos ensaios, para cada temperatura. Os valores de densidade, viscosidade e condutividade térmica do ar foram extraídos de SILVA (1980).

No seu cálculo utilizou-se a fórmula de McADAMS (1954) para transferência de calor entre esferas e o ar:

$$h D/K_f = 0,37 (Re)^{0,6} \quad (39)$$

Onde: h => Coeficiente de filme (cal/m²h°C);

K_f => Condutividade térmica do ar (cal/m h °C);

D => Diâmetro do fruto (m);

Re => Número de Reynolds.

O número de Reynolds foi calculado por:

$$Re = VdD/\eta \quad (40)$$

Onde: V => Velocidade do ar (m/h);

d => Massa específica do ar (Kg/m³);

D => Diâmetro do fruto (m);

η => Viscosidade do ar (Kg/h m)

CONDUTIVIDADE TÈRMICA (**K**), DIFUSIVIDADE TÈRMICA (**a**),
FATOR DE ATRASO (**J**) E TAXA DE RESFRIAMENTO (**TR**) - MÈTODO ANALÌTI-
CO - NUMÈRICO

Na obtenção dos parâmetros **K** e **a** pelo método analítico utilizou-se a solução da lei de Fourier. Desprezando-se os termos da série após o primeiro, de acordo com PFLUG & BLAISDELL (1963) tem-se:

$$\frac{(T - T_r)}{(T_i - T_r)} = 2 \frac{\text{sen}M_1 - M_1 \text{cos}M_1}{M_1 - \text{sen}M_1 \text{cos}M_1} \exp(-M_1^2 a t / R^2) \frac{\text{sen}[M_1 (r/R)]}{M_1 (r/R)} \quad (43)$$

Onde: **T** => Temperatura do corpo em qualquer instante;
T_r => Temperatura do meio resfriante;
T_i => Temperatura inicial do corpo;
a => Difusividade térmica do corpo;
t => Tempo decorrido;
R => Raio do corpo;
r => Distância a partir do centro;
M_i => Representam as raízes da equação transcen-
dental:

$$NB_i = 1 - (M_i / \text{tg}M_i) \quad (42)$$

Do termo $-M_1^2 a / R^2$, utilizando-se o método dos mínimos quadrados pelo algoritmo de Levenberg-Marquardt de regressão não linear, encontrou-se os coeficientes **J'** e taxa de resfriamento (**TR**). Onde:

$$TR = M_1^2 a/R^2 \quad (44)$$

$$J' = \frac{2\text{sen}M_1 - M_1 \text{cos}M_1}{M_1 - \text{sen}M_1 \text{cos}M_1} \cdot \frac{\text{sen}M_1 (r/R)}{M_1 (r/R)} \quad (45)$$

Das relações $NB_i = hR/K$ e

$$a = K/C_p d \quad (46)$$

Aplicadas na Equação 44 temos:

$$\frac{hR \cdot M_1^2}{(TR)R^2 C_p d} = (1 - M_1/\text{tg}M_1) \quad (47)$$

A Equação 47 foi resolvida pelo método da secante, extraíndo-se a raiz M_1 . Com o valor de M_1 aplicada na Equação 44, calculou-se os valores de K e a .

NÚMERO DE BIOT (NB_i)

O número de Biot (NB_i) foi calculado da fórmula:

$$NB_i = hR/K \quad (48)$$

Onde: $R \Rightarrow$ Raio do fruto (m).

Calculou-se dois números de Biot, a partir da condutividade térmica obtida pelo método analítico e a partir da condutividade térmica obtida pelo método gráfico.

O valor de J foi obtido da relação

$$J = \frac{J'}{\text{sen}[M_1 (r/R)]/M_1 (r/R)} \quad (49)$$

O fator de atraso J foi também obtido aplicando-se diretamente o valor da raiz M_1 na Equação:

$$J = \frac{2\text{sen}M_1 - M_1 \text{cos}M_1}{M_1 - \text{sen}M_1 \text{cos}M_1} \quad (50)$$

O índice de inclinação ou fator f foi calculado pela fórmula dada por PFLUG & BLAISDELL (1963) a partir da relação com a taxa de resfriamento:

$$f = 2,303/TR \quad (51)$$

O meio tempo de resfriamento foi calculado pela fórmula de YOST *et alii* (1977):

$$Z = 0,693/TR \quad (52)$$

CONDUTIVIDADE TÉRMICA E DIFUSIVIDADE TÉRMICA - MÉTODO GRÁFICO

Terminado o processo de resfriamento, encontrou-se a razão:

$$y = (T - T_r)/(T_i - T_r) \quad (53)$$

Onde: T => Temperatura final do produto medida no termopar;

T_r => Temperatura de resfriamento;

T_i => Temperatura inicial do fruto.

Conhecida a distância do ponto de tomada de temperatura ao centro do fruto e supondo que a temperatura na superfície do produto atinge instantaneamente a temperatura do meio resfriante,

utilizou-se a carta de GURNEY & LURIE (1923) para esferas para obtenção do número de Fourier. Com o número de Fourier calculou-se a condutividade térmica pela relação:

$$K = F_0 d C_p R^2 / t \quad (54)$$

Onde: F_0 => Número de Fourier;

d => Massa específica do produto (Kg/m^3);

R => Raio do produto (m);

t => Tempo de duração do processo de resfriamento (h).

e a difusividade térmica da relação:

$$a = K/dC_p \quad (55)$$

CURVAS DE RESFRIAMENTO

As curvas de resfriamento foram plotadas em sistemas de eixos mono-log, com o eixo dos tempos em escala linear e o eixo das temperaturas (adimensionais) em escala logarítmica. Foram plotadas as curvas de resfriamento exemplar a exemplar, as curvas médias (médias dos tempos e temperaturas) para cada temperatura de resfriamento individualmente (Apêndice C) e as curvas médias sobre um único sistema de eixos (Figura 03).

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - Maturidade

A determinação do grau de maturidade pela consistência foi feita sobre 50 exemplares e está expressa na Tabela 01 em termos de milímetros de penetração da ponta cônica.

A penetração média foi de 1,38 mm, como desvio da média de $\pm 25\%$. Isto caracteriza a maturidade do material utilizado, cujo padrão é de um produto meio maduro, utilizado nas determinações experimentais.

TABELA 01 - Teste de penetração em frutos com 500 g de carga.

EXEMPLAR	PENETRAÇÃO (mm)	NÚMERO	PENETRAÇÃO (mm)
01	1,19	26	1,78
02	0,79	27	1,99
03	1,38	28	1,12
04	1,20	29	1,14
05	1,13	30	1,48
06	1,61	31	1,41
07	1,78	32	2,19
08	1,18	33	1,00
09	1,68	34	1,26
10	1,09	35	1,47
11	1,51	36	1,21
12	1,53	37	2,12
13	1,72	38	1,49
14	1,20	39	1,04
15	0,85	40	0,68
16	1,47	41	1,20
17	1,11	42	1,49
18	1,66	43	1,03
19	1,32	44	1,10
20	1,78	45	1,80
21	1,19	46	1,30
22	1,40	47	1,02
23	2,30	48	1,20
24	0,89	49	1,88
25	1,56	50	1,22

Média dos 50 exemplares = 1,38 mm; DP = 0,358

4.2 - Dimensões

A caracterização do tamanho foi feita com a medição dos três eixos perpendiculares para cinquenta frutos. Os dados obtidos são mostrados na Tabela 02 e a média está em acordo com as observações de DUQUE (1980) e se constata que o umbu tem os três eixos com praticamente as mesmas dimensões, podendo ser considerado um esferóide, uma vez que a diferença entre o eixo longitudinal e o eixo transversal maior é de 6% e a diferença entre os eixos longitudinal e transversal menor é de 12% .

TABELA 02 - Dimensões dos frutos.

EXEMPLAR	E. MAIOR (mm)	E. MENOR (mm)	E. LONGIT. (mm)
01	31,90	29,45	32,25
02	38,90	36,20	39,90
03	36,65	34,00	40,45
04	34,40	31,90	38,60
05	34,80	32,00	39,15
06	32,65	30,70	38,10
07	33,65	32,05	36,00
08	36,20	34,20	37,20
09	33,55	31,70	39,30
10	33,45	32,20	38,80
11	33,30	31,50	37,15
12	35,10	33,40	38,10
13	36,45	34,30	36,70
14	34,55	31,45	36,60
15	36,80	34,85	38,00
16	34,05	31,60	38,20
17	29,65	28,85	27,30
18	37,65	35,25	38,45
19	31,85	30,00	34,15
20	30,65	28,90	32,45
21	31,95	30,25	33,00
22	31,25	28,80	32,60
23	32,75	30,90	36,60
24	32,70	31,00	34,10
25	30,75	28,70	32,90

Continuação

EXEMPLAR	E. MAIOR (mm)	E. MENOR (mm)	E. LONGIT. (mm)
26	36,35	33,50	38,25
27	31,55	29,55	31,40
28	31,85	30,90	33,60
29	35,40	33,00	37,70
30	34,95	31,30	36,60
31	32,20	29,35	33,25
32	30,85	29,40	32,75
33	31,80	29,75	32,45
34	32,10	29,95	34,45
35	34,40	31,70	35,15
36	35,80	33,40	38,60
37	34,25	31,20	36,85
38	31,80	30,60	35,30
39	36,20	34,20	37,00
40	30,10	29,15	34,10
41	35,55	33,75	38,05
42	34,40	31,40	37,95
43	36,15	33,85	38,05
44	32,50	28,70	30,50
45	32,80	30,40	36,20
46	36,60	35,25	37,80
47	35,30	32,10	37,30
48	36,15	34,60	38,65
49	34,95	31,85	36,50
50	37,75	35,80	39,60

M=33,95;DP=2,2 M=31,77;DP=2,1 M=36,10;DP=2,8

Os exemplares medidos foram retirados aleatoriamente do volume total trazido do campo, podendo-se esperar, portanto, uma boa representatividade dos valores apresentados.

Na Tabela 03 são mostrados os volumes que foram determinados para cinquenta exemplares. Sua média é de 22 cm³, com variação de $\pm 4,2$ cm³, ou seja, o umbu tem um volume próximo ao volume do limão e a variação deste parâmetro é de aproximadamente 18% sobre a média.

TABELA 03 - Dados de volume para 50 frutos.

EXEMPLAR	VOLUME (cm ³)	EXEMPLAR	VOLUME (cm ³)
01	21,31	26	17,65
02	32,00	27	17,99
03	17,11	28	28,51
04	21,93	29	16,85
05	22,30	30	25,71
06	28,61	31	27,83
07	16,78	32	19,19
08	20,67	33	23,05
09	23,86	34	24,31
10	30,73	35	19,06
11	24,03	36	21,83
12	24,80	37	18,73
13	24,09	38	20,73
14	20,03	39	23,57
15	27,23	40	22,15
16	25,17	41	21,48
17	27,82	42	21,37
18	27,32	43	21,42
19	25,17	44	22,13
20	20,28	45	25,49
21	32,18	46	16,45
22	19,68	47	19,05
23	16,67	48	19,40
24	15,38	49	19,75
25	16,96	50	19,45

M = 22,3 cm³; DP = 4,2

4.3 - Circularidade

A circularidade média de 86,7% observada na Tabela 04, obtida dos exemplares 01 a 15 do Apêndice A, indica um produto praticamente sem arestas. Esta característica torna-o especialmente adequado a processos de seleção por peneiras e a passagem por condutos circulares, como mencionado em MOHSENIN (1978) para seleção de frutas. A variação deste valor médio é $\pm 6\%$, o que confere aos frutos uma boa uniformidade física.

TABELA 04 - Dados de circularidade para 15 frutos.

EXEMPLAR	CIRCULARIDADE (%)
01	81,6
02	86,4
03	88,9
04	82,1
05	87,3
06	93,2
07	78,6
08	81,6
09	85,5
10	90,5
11	95,9
12	98,8
13	88,2
14	81,5
15	81,5

M = 86,8
 DP = 5,7

4.4 - Esfericidade

A esfericidade de quinze frutos é apresentada na Tabela 05 e foi obtida dos exemplares 01 a 15 do Apêndice B. A média de 92% para este parâmetro, com uma variação de $\pm 3\%$, confirma a forma esferóide do umbu e a excelente uniformidade verificada entre os exemplares, já detectada nos dados de circularidade.

Os dados desta Tabela, mostrando um alto percentual médio de esfericidade, fazem do umbu um fruto com ótimas características de rolagem. Propicia também facilidade à passagem do fluxo de ar forçado, em caixas ou volumes em geral, uma vez que o formato esférico cria espaços vazios regulares em massas acondicionadas. Por outro lado, este padrão faz a exigência de maiores espaços para transporte e alocação do produto.

TABELA 05 - Dados de esfericidade para 15 frutos.

EXEMPLAR	ESFERICIDADE (%)
01	90,7
02	98,5
03	90,9
04	89,9
05	92,9
06	91,7
07	88,4
08	94,9
09	91,7
10	93,9
11	85,8
12	91,2
13	96,2
14	90,5
15	93,3
M = 92,0 DP = 3,0	

4.5 - Massa e massa específica

Os valores de massa e massa específica estão na Tabela 06. A média das massas de cinquenta exemplares foi de 23,78 gramas, com um desvio padrão de 3,99. A massa específica média, calculada para os mesmos cinquenta exemplares foi de 1,06 g/cm³, com um desvio padrão de 0,023. Os valores da massa específica estão próximos dos valores da massa específica da água, o que sugere a presença de alto percentual de suco.

TABELA 06 - Dados de massa e massa específica para 50 frutos.

EXEMPLAR	MASSA (g)	M. ESPEC. (g/cm ³)	EXEMPLAR	MASSA (g)	M. ESPEC. (g/cm ³)
01	26,88	1,07	26	22,45	1,05
02	29,05	1,04	27	22,58	1,06
03	28,86	1,06	28	22,68	1,06
04	26,54	1,05	29	23,36	1,06
05	21,77	1,07	30	26,77	1,05
06	34,10	1,06	31	25,85	1,05
07	20,67	1,05	32	23,00	1,04
08	17,71	1,06	33	25,95	1,18
09	16,13	1,05	34	16,80	1,05
10	18,03	1,06	35	20,80	0,99
11	18,45	1,05	36	29,05	1,05
12	18,89	1,05	37	23,70	1,03
13	30,26	1,06	38	27,15	1,02
14	17,94	1,06	39	21,95	1,03
15	27,28	1,06	40	30,25	1,05
16	29,48	1,06	41	27,70	1,06
17	20,01	1,04	42	28,90	1,04
18	24,57	1,07	43	24,50	1,04
19	25,65	1,06	44	23,20	1,07
20	19,99	1,05	45	25,45	1,06
21	23,24	1,06	46	23,20	1,06
22	19,87	1,06	47	25,45	1,06
23	22,01	1,06	48	23,20	1,06
24	25,11	1,07	49	20,80	1,06
25	23,23	1,05	50	18,40	1,02

M_{esp} = 1,06; DP = 0,023 M = 23,78 DP = 3,99

4.6 - Calor específico

Na determinação do calor específico encontrou-se o valor médio de 0,6666 cal/g °C. Este valor está abaixo dos valores relatados em TURREL & PERRY (1957), FRECHETTE & ZAHRADNIK (1966) para frutos. No entanto, é um valor intermediário entre os calores específicos de frutos e grãos (KAZARIAN, 1965 e HASWELL, 1954).

Tratando-se de um fruto cuja semente é grande em relação ao seu tamanho total, é razoável que se obtenha um valor entre os dois extremos.

Testes preliminares realizados com o calorímetro demonstraram, ao final de vinte minutos de agitação com conteúdo de água a 14,7°C, um aumento de temperatura de 0,2°C, o que representa cerca de 1% de acréscimo. Em testes de dez minutos não se detectou variações de temperatura, ou seja, pode-se considerar o processo como adiabático, o que confere confiabilidade a esses valores.

4.7 - Coeficiente de filme

Os valores encontrados para o coeficiente de filme são mostrados na Tabela 07.

TABELA 07 - Número de Reynolds e coeficiente de filme para seis diferentes temperaturas.

T (°C)	Re	h (cal/h m ² °C)
-20,3	8377	47288
-17,0	8015	46771
-15,5	7630	47457
-13,6	7798	46680
-11,9	7530	46292
- 9,8	7024	47244

T = Temperatura

Re = Número de Reynolds

h = Coeficiente de filme

A diferença entre o maior e o menor valor para o coeficiente de filme foi inferior a 3% . Além disso, estes valores extremos não correponderam às temperaturas extremas. Tal constatação confirma as observações de ARCE & SWEAT (1980), que não observaram uma relação entre temperatura e coeficiente de filme.

4.8 - Raiz da equação transcendental

Os resultados da raiz da equação transcendental (Eq. 42) são apresentados na Tabela 08, onde observa-se uma pequena variação do valor da raiz para as diferentes temperaturas, sendo que o valor médio é de 2,5446.

TABELA 08 - Dados da raiz da Equação 42 (M_1) para seis diferentes temperaturas.

T (°C)	B_1
-20,3	2,5959
-17,0	2,6046
-15,5	2,5439
-13,6	2,5162
-11,9	2,5213
- 9,8	2,4856

T = Temperatura

M_1 = Raiz da equação transcendental

M = 2,5446

4.9 - Condutividade térmica

Os valores calculados de condutividade térmica podem ser vistos na Tabela 09.

A condutividade térmica média calculada pelo método gráfico foi 20% superior aquela calculada pelo método analítico. Esta diferença pode ser explicada pela região da carta de GURNEY-LURIE (1923) utilizada, que é uma região onde a precisão é reduzida. Mesmo assim, as diferenças são bem inferiores às diferenças observadas por SRINIVASA MURTHY *et alii* (1976) quando comparando valores calculados para produtos de formato esférico, com valores extraídos da referida carta.

TABELA 09 - Dados de condutividade térmica para seis diferentes temperaturas.

T (°C)	K ₁ (Cal/h m °C)	K ₂ (Cal/h m °C)
-20,3	157,1	212,8
-17,0	151,1	178,0
-15,5	166,5	218,4
-13,6	178,2	198,1
-11,9	172,6	221,7
- 9,8	177,7	183,9
	M = 167,2 DP = 10,2	M = 202,1 DP = 16,8

K₁ = Condutiv. térmica calculada pelo método analítico

K₂ = Condutiv. térmica calculada pelo método gráfico

Observa-se ainda que os valores obtidos para a condutividade térmica são inferiores aqueles apresentados em literatura para condutividade térmica de frutos (TURREL & PERRY, 1957; KETHLEY *et alii*, 1950; SWEAT, 1974). Deve-se levar em conta porém, as peculiaridades das condições onde vegeta o umbuzeiro, que exige adaptações ainda pouco estudados. As altas temperaturas, aliadas a baixa umidade relativa do ar da região semi-árida, exigiriam das plantas nativas, frutas com baixa capacidade de transmissão de calor visando preservá-las de aquecimentos excessivos prejudiciais a sua integridade.

4.10 - Difusividade térmica

Na Tabela 10 encontram-se os valores calculados de difusividade térmica, para as temperaturas de pré-resfriamento empregadas.

TABELA 10 - Dados de difusividade térmica para seis diferentes temperaturas.

T (°C)	a ₁ (m ² /s) 10 ⁶	a ₂ (m ² /s) 10 ⁶
-20,3	0,06176	0,08365
-17,0	0,05941	0,06999
-15,5	0,06556	0,08580
-13,6	0,07004	0,07786
-11,9	0,06785	0,08715
- 9,8	0,06986	0,07230
	M = 0,06575 DP = 0,00400	M = 0,07946 DP = 0,00658

a₁ = Difusividade térmica calculada a partir de K₁ da Tabela 09

a₂ = Difusividade térmica calculada a partir de K₂ da Tabela 09

Uma vez que a difusividade foi calculada da condutividade térmica relacionada com o calor específico e a massa específica, os resultados analíticos comparados com os resultados gráficos tem diferença percentual idêntica à observada entre as condutividades térmicas. Autores como FRECHETTE & ZAHRADNIK (1968) estudando propriedades de maçãs apresentaram valores de difusividade térmica intermediários entre os valores calculados pelos dois métodos, neste trabalho. GAFFNEY *et alii* (1980) citando diversos autores mostram valores para um mesmo produto que diferem em até mais de 90% . A difusividade calculada para o umbu se enquadra na faixa das mínimas encontrados na literatura.

4.11 - Número de Biot

Os números de Biot são mostrados na Tabela 11.

TABELA 11 - Valores calculados para o NB_i .

T (°C)	$NB_i(1)$	$NB_i(2)$
-20,3	5,3	3,9
-17,0	5,4	4,6
-15,5	4,7	3,6
-13,6	4,5	4,0
-11,9	4,5	3,5
- 9,8	4,2	4,1

$M = 4,80$ $M = 3,90$
 $DP = 0,44$ $DP = 0,36$

$NB_i(1)$ = Calculado com o valor de K_1

$NB_i(2)$ = Calculado com o valor de K_2

Os resultados médios da Tabela 11, obtidos na faixa de 4,0 estabelecendo a relação entre as condutividades térmicas externa e interna, confirmam o acerto de se ter utilizado a lei de Fourier para o cálculo dos parâmetros de transferência de calor satisfazendo a condição citada em ARCE & SWEAT (1980), que estabelecem um valor de NB_i acima de 0,1 para se poder utilizar a Lei de Fourier.

4.12 - Fator de atraso

Na Tabela 12 são mostrados os valores de J' , J_1 e J_2 correspondentes aos fatores de atraso das curvas de resfriamento

do umbu para as seis temperaturas estudadas.

TABELA 12 - Dados de fator de atraso em seis diferentes temperaturas.

T (°C)	J'	J ₁	J ₂
-20,3	1,033	1,23	1,80
-17,0	1,089	1,33	1,81
-15,5	1,016	1,28	1,77
-13,6	1,070	1,31	1,76
-11,9	1,050	1,29	1,76
- 9,8	1,036	1,30	1,74

M = 1,290 M = 1,770
DP = 0,031 DP = 0,024

J₁ = Valor calculado pela fórmula

$$J_1 = J' / [\text{sen} M_1(r/R) / M_1(r/R)]$$

J₂ = Valor calculado pela fórmula

$$J_2 = 2[(\text{sen} M_1 - M_1 \cos M_1) / (M_1 - \text{sen} M_1 \cos M_1)]$$

Os valores de J₂ na Tabela 12 são mais confiáveis que os de J₁ porque foram calculados usando a raiz M₁, obtida da inclinação da curva de resfriamento. Como observado por KOPELMAN *et alii* (1966), variações na inclinação da curva afetam pouco o valor da taxa de resfriamento e conseqüentemente de M₁. O valor de J₁, entretanto, cujo cálculo envolveu análise de regressão, sofre alterações significativas mesmo para pequenas variações na inclinação da curva. A diferença percentual entre J₂ e J₁ médios ficou em torno de 27% .

4.13 - Taxa de resfriamento e fator f

Na Tabela 13 são mostrados os valores da taxa de resfriamento e do fator f, bem como os diâmetros médios dos exemplares usados.

TABELA 13 - Dados da taxa de resfriamento em seis diferentes temperaturas.

T (°c)	TR (h ⁻¹)	f (h)	Dm (mm)
-20,3	4,88	0,47	35,1
-17,0	4,81	0,48	34,8
-15,5	5,52	0,41	33,2
-13,6	5,45	0,42	34,2
-11,9	5,44	0,42	33,8
- 9,8	6,14	0,37	31,8

As taxas de resfriamento calculados para as seis temperaturas empregados não indicam uma relação direta com a temperatura de resfriamento. Os dados apresentados por SPAGNOL (1989), para resfriamento de mangas a ar forçado também mantiveram essa tendência.

Os tempos necessários para os frutos atingirem 5°C são vistos na Tabela 14.

TABELA 14 - Dados do tempo de resfriamento em seis diferentes temperaturas.

T (°C)	t (min) *	T _i (°C)
-20,3	6,7	22,9
-17,0	8,2	22,8
-15,5	6,2	21,4
-13,6	7,7	22,5
-11,9	7,4	21,4
- 9,8	7,1	21,3

* Valores obtidos por regressão linear para atingir 5°C

Na Tabela 14 não se percebe tendência dos tempos crescerem com o aumento de temperatura, na faixa estudada. As diferenças observadas podem ser atribuídas às diferenças verificadas nas médias dos diâmetros dos frutos (10% nos casos extremos) e nas temperaturas médias iniciais (diferença de 6% entre a máxima e a mínima) que podem influenciar no processo de resfriamento (BAKKER-ARKEMA *et alii*, 1979 e SOULE *et alii*, 1966).

4.14 - Meio tempo de resfriamento

Na Tabela 15 são apresentados os meio tempo de resfriamento.

TABELA 15 - Dados do meio tempo de resfriamento em seis diferentes temperaturas.

T (°C)	Z (h)
-20,3	0,14
-17,0	0,14
-15,5	0,12
-13,6	0,13
-11,9	0,13
- 9,8	0,11

Assim como a taxa de resfriamento e o fator f , o meio tempo de resfriamento não sofreu redução com a diminuição da temperatura, na faixa empregada, o que vem confirmar que dentro desta faixa, não se observam diferenças entre utilizar a temperatura de $-9,8^{\circ}\text{C}$ ou de $-20,3^{\circ}\text{C}$. Pode-se depreender do observado na taxa de resfriamento, no fator f e no meio tempo de resfriamento, que a temperatura de resfriamento mais indicada sob as condições deste experimento, é de -10°C , pois proporciona o resfriamento do fruto praticamente no mesmo tempo de -20°C , com menor gasto de energia.

4.15 - Curvas de resfriamento

As curvas médias de resfriamento para as seis temperaturas utilizadas foram plotadas individualmente e são mostradas nas Figuras 01 a 06 do Apêndice C. Na Figura abaixo, as seis curvas foram plotadas num único sistema de eixos. Percebe-se que as maiores inclinações não correspondem as temperaturas mais

baixas, isto é, a faixa de temperatura de resfriamento empregada é suficientemente estreita para não influir nos tempos de resfriamento.

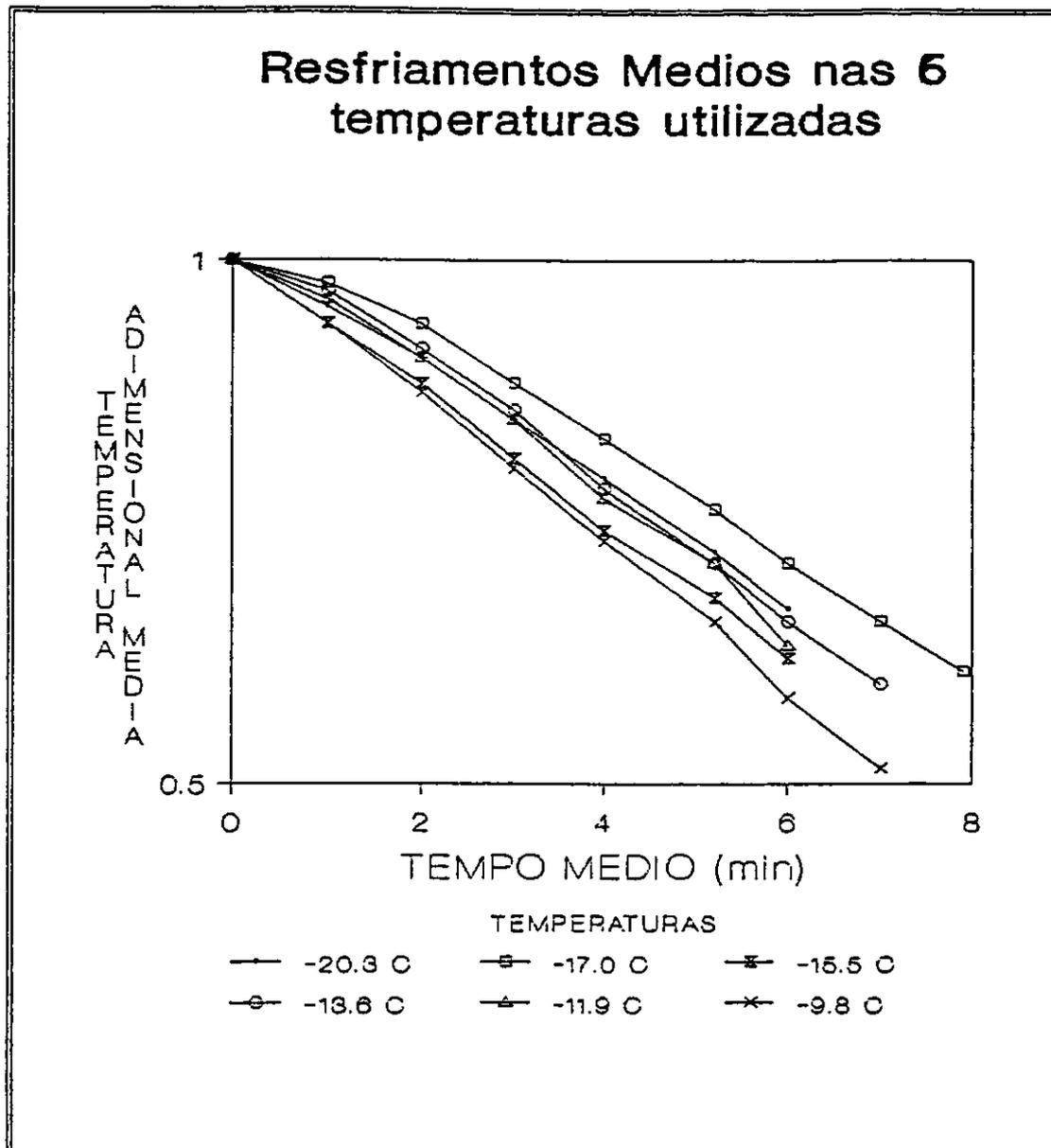


FIGURA 03 - Representação gráfica das médias dos resfriamentos.

5 - CONCLUSÕES

1 - Com relação as propriedades físicas do umbu, conclui-se que:

- a) A circularidade é de $86,7\% \pm 6\%$ e a esfericidade é de $92\% \pm 3\%$;
- b) As dimensões medidas nos três eixos mutuamente perpendiculares são em média de $36 \times 33 \times 31$ cm; o volume tem um valor médio de $22 \text{ cm}^3 \pm 18\%$;
- c) O valor médio de massa é $23,78 \pm 3,99$ g. O valor médio de massa específica é $1,06 \pm 0,023 \text{ g/cm}^3$.

2 - Quanto as características térmicas pode-se concluir que:

- a) A condutividade térmica tem um valor médio de 167 ± 10 cal/hm°C e a difusividade térmica tem um valor médio de $0,06575 \times 10^6 \pm 0,004 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$; o calor específico é de $0,6667 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ e o coeficiente de filme foi igual a $47000 \text{ cal/hm}^2^\circ\text{C}$, em média.

3 - Com relação ao pré-resfriamento do umbu com ar forçado a $2,8 \text{ m/s}$ pode-se concluir:

- a) No resfriamento a ar forçado com temperatura de resfriamento entre -10°C e -20°C , não se justifica o emprego de temperaturas abaixo de -10°C . O tempo de resfriamento praticamente não difere para faixa de temperatura utilizada, como se observa através dos valores da taxa de resfriamento, do fator f e do meio tempo de resfriamento, que

tem os valores médios de $5,37 \pm 0,44 \text{ h}^{-1}$, de $0,43 \pm 0,04 \text{ k}$
e de $0,13 \pm 0,01 \text{ h}$, respectivamente.

Recomendações:

- 1 - Fazer o resfriamento para volumes de material.
- 2 - Fazer o resfriamento com o produto fresco.
- 3 - Utilizar termopares de diâmetro inferior ao empregado (0,7 mm).
- 4 - Verificar o quanto o calor específico varia com a temperatura e verificar o quanto este parâmetro afeta a condutividade térmica.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDUL MAJEED, P. M.; SRINIVASA MURTHY, S.; KRISHNA MURTHY, M. V. Prediction of aircooling characteristics os moist food products. **Trans. of the ASAE**, v. 23, 1980. 788p.
- ANÔNIMO. O umbuzeiro. In: **O Agrônômico**. n. 19, p. 3 - 4, 1967.
- ARCE, J.; SWEAT, V. E. Survey of published heat transfer coefficients encountered in food refrigeration processes. **Trans. of the ASHRAE**. v. 86, n. II, p. 235 - 260. 1980.
- ARPACI, V.S. **Conduction heat transfer**. Reading New York, NY. Addison Wesley, 1966. 288p.
- BAIRD, C. D.; GAFFNEY, J. J. A numerical producere for calculating heat transfer in bulk loadds of fruits or vegetables. **Trans. of the ASHRAE**. v. 82, n. 2, p. 525 - 540. 1976.
- BAKKER-ARKEMA, F. W.; BICKERT, W. G.; EVANS, T. W.; ROSEANAN, J. R. Cooling rates of sugar beets. **Trans. of the ASAE**. v. 16, n. 4. p. 468 - 74. 1979.
- BARBOSA, J. J. **Introdução à tecnologia de alimentos**. Livraria Kosmos Editora S.A. Rio de Janeiro, RJ. 1976. 118p.
- BENNETT, A. H. Precooling fruits and vegetables. **Trans. of the ASAE**. Athens, GE. v. 7, n. 3, p. 265-270. 1964.
- BENNET, A. H.; SOULE, J.; YOST, G. E. Temperature response of Florida citrus to forced air precooling. **ASHRAE J.** v. 8, n. 4, p. 48 - 66. 1966.
- BLEINROTH, E. W. Armazenamento de frutas e hortaliças. I - Fundamentos teóricos da conservação pelo frio de frutas e hortaliças. **Bol. ITAL** n. 34, p. 35 - 53. 1973.
- BLEINROTH, E. W. Armazenamento de frutas e hortaliças. II - Condições de armazenamento e sua operação. **Bol. ITAL** n. 34. p. 55 - 67. 1973.
- BLEINROTH, E. W. Fatores que afetam a respiração das frutas e hortaliças e o controle de CO₂ na câmara. **Bol. ITAL** n. 44. p. 1 - 5. 1975.
- BHOWMIK, S. R.; HAYAKAWA, K. A new method for determining the apparent thermal diffusivity of thermally conductive food. **J. Food. Sci.** v. 44, n. 2, p. 469 - 64. 1979.
- CAVALCANTI MATA, M. E. R. M. & FERNANDES FILHO, J. G. Determinação da porosidade de sementes de mamona e algaroba. **Revista Nordestina de Armazenagem**. v. I, n. 1, p. 3 - 31, 1984.

- CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; ARAGÃO, R. F.; SANTANA, E. F.; SILVA, F. A. S. Estudo da morfologia geométrica em grãos. **Revista Nordestina de Armazenagem**. v. III, n. 1, p. 3 - 30, 1986.
- CLARY, B. L.; NELSON, G. L. Determination of the convective heat transfer coefficients from ellipsoidal shapes to gases. **ASAE paper**. n.68, 1968. 873p.
- DICKERSON, R. W. An apparatus for measurement of thermal diffusivity of foods. **Food Technology**. v. 19, n. 5, p. 198 - 204.
- DICKERSON, R. W.; READ, R. B. Cooling rates of foods. **J. Milk Food Technol.** v. 36, n. 3, p. 167 - 71. 1973.
- DUQUE, J. G. **O Nordeste e as lavouras xerófilas**. 3ª Ed., Mossoró, RN. Escola Superior de Agricultura de Mossoró, 1980. 316p.
- ECKERT, J. W. & SOMMER, N. F. Control of diseases of fruits and vegetables by postharvest treatment. **Ann. Rev. Phytopath.** n. 5, p. 391 - 432, 1967.
- FRECHETTE, R.J. ZAHRADMK, J. W. Thermal properties of the McIntosh apple. **Tras. of the ASAE**, v. 11, n. 1, p. 21 - 27. 1968.
- FREEMAN, M. Heat capacity and bound water in starch suspension. **Archives of Biochemistry**. n. 1, p. 27 - 39. 1943.
- GAVA, A. J. **Princípios de tecnologia de alimentos**. 2ª Ed., São Paulo, SP. Ed. Nobel, 1979. 283p.
- GAFFNEY, J. J.; BAIRD, C. D.; CHAU, K.V. Methods for calculating heat and mass transfer in fruits and vegetables individual and in bulk. **Trans. ASHRAE** 91 n. 2B, p. 333 - 52. 1985.
- GAFFNEY, J. J.; BAIRD, C. D.; ESHLEMAN, W. D. Review and analysis of the transient method for determining thermal diffusivity of fruits and vegetables. **Trans. of the ASHRAE**. v. 86, n. 2, p. 261 - 80. 1980.
- GOULDEN, C. H. **Methods of statistical analysis**. John Willey and Sons, Inc. New York. NY. 1952.
- GRIFFITHS, J. C.; SMITH, C. M. Relationship between volume and axes of some quartzite pebbles from the ohan conglomerate rock city. New York, NY. **Am. J. of Sci.** v. 262, n. 4, p. 497 - 512. 1964.
- GROEBER, H.; ERK, S.; GRIGULL, U. **Fundamentals of heat transfer**. McGraw-Hill Book company, Inc. New York, NY. 1961.

- GUILLOU, R. Forced air fruit cooling. *Trans. of the ASAE*. v. 3, n. 2, p. 16 - 8, 1960.
- GUILLOU, R. Pressure cooling for fruits and vegetables. *ASHRAE J.* New York, NY. v. 5, n. 11, p. 45 - 49. 1963.
- GUILLOU, R. Some engineering aspects of cooling fruits and vegetables. *Trans. of the ASAE*. v. 1, n. 1, p. 38 - 42, 1958.
- GURNEY, H. P. & LURIE, J. Charts for estimating temperature distributions in heating or cooling of solid shapes. *Ind. Eng. Chem.* Washington, DC. v. 15, n. 11, p. 1170 - 1172. 1923.
- HASWELL, G. A. A note on the specific heat of rice, oats, and their products. *Cereal Chem.* n. 31, 341 - 3. 1954.
- HEISLER, M. P. Temperature charts for induction and constant temperature heating. *Trans of the ASAE*. v. 69, n. 4, p. 227 - 236. 1947
- HOUSTON, R. K. New criterion of size for agricultural products. *Agricultural Engineering*. v. 39, n. 12, p. 856 - 858. 1957
- HASWELL, G. A. A note on the specific heat of rice, oats, and their products. *Cereal chem.* n. 31, p. 341 - 3. 1954.
- KADER, A. A. Role of plant hormones, especially ethylene in senescence. *Syllabus of the postharvest physiology and handling of horticultural commodities course*. University of California. Davis, CA. 1979. 13p.
- KAZARIAN, E. A.; HALL, C. W. Thermal properties of grains. *Trans. of the ASAE*. v. 8, n. 1. p. 33 - 7, 48. 1965.
- KETHELEY, T. W.; COWN, W. B.; BELLINGER, F. An estimate of thermal conductivities of fruits and vegetables. *Refrigerating engineering*. v. 58, n. 1. p. 49 - 50. 1950.
- KOPELMAN, I.; BLAISDELL, J. L.; PFLUG, I. J. Influence of fruits size and coolant velocity on the cooling of jonathan apples in water and air. *Trans. of the ASHRAE*. v. 72, n. 1, p. 209 - 16. 1966.
- KUNKEL, R. G.; EDGAR, P.F.; BINKLEY, A. M. The mechanical separation of potatoes into specific gravity groups. *Col. Agr. Exp. Sta. Bul.* 1952. 422A.
- KUSHMAN, L. J.; BALLINGER, W. E. Forced-air cooling of blueberries. *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.*, n. 81, p. 281 - 287. 1961.
- LAJOLO, F. M. Regulação do amadurecimento de frutas e controle da senescência. *Bol. SBCTA*. Campinas, SP. n. 48, 1979. 145p.

- LENTZ, C. P.; BERG, L. V. D. Cabbage precooling study. *J. Inst. Can. Sci. Technol. Aliment.* v. 10, n. 4, p. 265 - 8. 1977.
- MAAK, L. O. The mechanical separation of potatoes and stones. *Londtechnische Forschung.* v. 7, n. 3, p. 71. **Translation n° 35.** National Institute of Agricultural Engineering. Bedfordshire, England. 1957.
- McADAMS, W. H. **Heat transmission.** McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, NY. 1954.
- McADAMS, W. H. **Heath transmission.** 3a. ed. Mcgraw-Hill. Book Company, inc., New York, NY. 1954. 532p.
- MITCHELL, F. G.; GUILLOU, R.; PARSONS, R. A. **Commercial cooling of fruits and vegetables.** Davis, CA. California Agricultural Experiment Station, Extension Service. 1972. 44p.
- MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials.** New York, NY. Gordon and Breach Pub, Inc. 1978. 742p.
- MOHSENIN, N. N. **Thermal properties of foods and agricultural materials.** New York. NY. Gordon and Breach Pub. Inc. 1980. 407p.
- NELSON, K. E. **Transpiration from fresh fruits and vegetables. Syllabus of the postharvest physiology and handling of horticultural commodities course.** University of California. Davis, CA. 1979. 13p.
- O'BRIEN, M.; GENTRY, J.P. Effect of cooling methods on cooling rates and accompanying desiccation of fruits. *Trans. of the ASAE.* p. 603 - 6. 1967.
- OLSON, F. C. W.; JACKSON, J. M. **The heating curves. Theory and pratical applications.** *Ind. Eng. Chem.* v. 34, n. 3, p. 337 - 341. 1942.
- ORDINANZ, W. O. **Specific heat of foods in cooling. Food industries.** v. 18, n.12, p. 101. 1946.
- OTIS, C. K.; POMROY, J. H. **Density, a tool in silo research.** *Agricultural Engineering.* v. 38, n. 11, p. 806-807.
- PANTASTICO, E. B. **Postharvest phisiology, handling and utilization of tropical and subtropical fruits and vegetables.** Westport, AVI pub. 1975. 560p.
- PARSONS, R. A.; MITCHEL, F. G.; MAYER, G. Forced air cooling of palletized fresh fruit. *Trans. of the ASAE.* v. 15, n. 40, p. 729 - 731.1972.

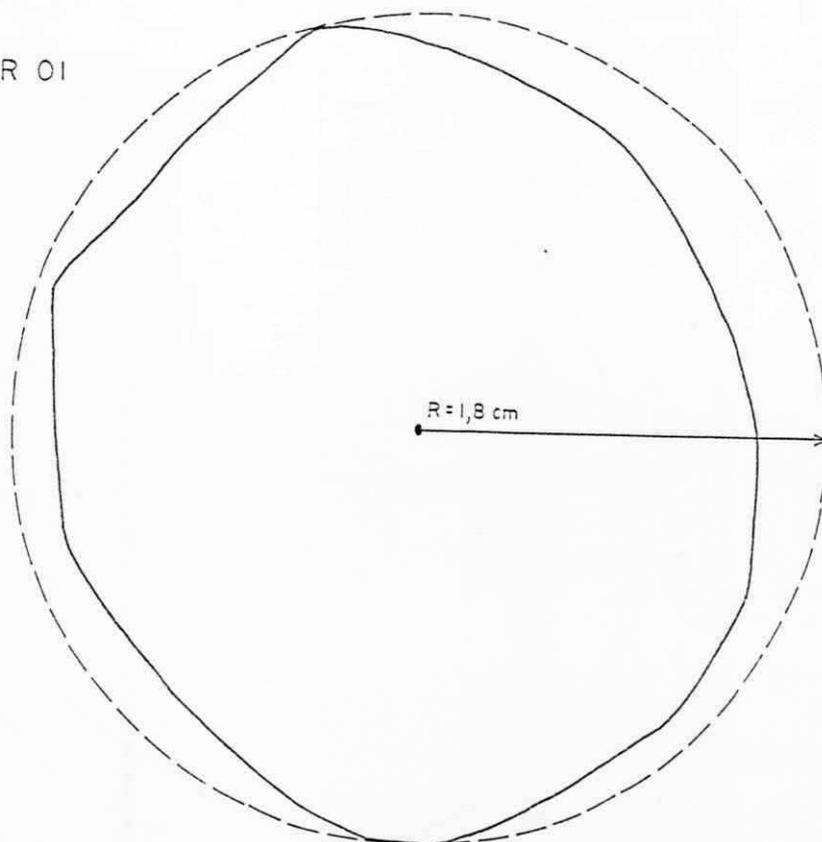
- PFLUG, I. J.; BLAISDELL, J. L.; KOPELMAN, I. J. Developing temperature-time curves for objects that can be approximated by a sphere, infinite plate or infinite cylinder. **Trans. of the ASHRAE**. v. 71, n. 1, p. 238 - 248. 1965.
- ROCHA, J. L. V.; SPAGNOL, W. A. **Armazenamento de gêneros e produtos alimentícios**. Secretaria da Industria, Comercio, Ciência e Tecnologia. São Paulo, SP.
- QUENOVILLE, M. H. **Associated measurements**. Butterworth-Sprinter. Ltd. London. 1952.
- SCHNEIDER, P. J. **Temperature response charts**. John Wiley and Sons, Inc. New York, NY. 1963.
- SHOWALTER, R. K.; GRIERSON, W. H. Precooling fruits and vegetables in the southeast. **At the semianual meeting of the ASHRAE**. San Francisco, CA. n. 5, p. 18 - 24. 1970.
- SIEBEL, E. Specific heats of various products. **Ice and refrigeration**. n. 2, p. 256 - 257.
- SILVA, A. Q.; SILVA, A. G. O. Observações morfológicas e fisiológicas sobre Spondias tuberosa, A. Câmara. In: CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, 25. Mossoró, 1974. **Anais**. p. 5 - 15.
- SILVA, B. R. **Manual de termodinâmica - Transmissão de calor**. Grêmio Politécnico. Universidade de São Paulo. 1980. 348p.
- SMITH, R. E.; NELSON, G. L.; HENRICKSON, R. L. Analysis on transient heat transfer from anomalous shapes. **Trans. of the ASAE**. v. 10, n. 2, p. 236 - 245. 1967.
- SOULE, J.; YOST, G. E.; BENNET, A. H. Certain heat characteristics of oranges, grapefruit and tangelos during forced-air precooling. **Trans. of the ASAE**. v. 9, n. 3, p. 355 - 358. 1966.
- SOUZA, A. H. C.; DUQUE, J. G. Umu e seu suco. **Revista Brasileira de Farmácia**. p. 335 - 353. 1970.
- SPAGNOL, W. A. **Estudo de pré-resfriamento em manga**. Campinas. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP. 1989. 193p.
- SRINIVASA MURTHY, S.; KRISHNA MARTHY, M. V.; RAMACHANDRAN, A. Heat transfer during aircooling and storing of moist food products - II. Spherical and cylindrical shapes. **Trans. of the ASAE**. n. 19, p. 577 - 83. 1976.
- STALHANE, B.; PYK, S. **New methods for determining the coefficient of thermal conductivity**. Tek-tidskr. n. 61, p. 328. 1931.

- STITT, F.; KENNEDY, E. K. **Specific heats of dehydrated vegetables and egg powder.** Food Research. n. 10, p. 426-436.
- SWEAT, V. E. Experimental values of thermal conductivity of selected fruits and vegetables. **J. Food Sci.** v. 39, n. 6. p. 1080 - 3. 1974.
- TURREL, F. M.; PERRY, R. L. Specific heat and Heat conductivity of citrus fruit. **Proc. of Amer. Soc. for Hort. Sci.** n. 70, p. 261 - 265, 1957.
- WILLIAMSON, E. D. & ADAMS, L. H. Temperature distributions in solids during heating or cooling. **Phys. Rev.** v. 14, n. 2, p. 99 - 114. 1919.
- YANG, S. F.; HOFFMAN, N. E. Ethylene biosynthesis and its regulation in higher plants. **Ann. Rev. Plant. Physiol.** n. 35, p. 155 - 189, 1984.
- YOST, G. E.; HOVEY, R.; COVEY, H. M. Cooling characteristics of anson pears in film-overwrapped trays. **Trans. of the ASAE.** v. 20, n. 1, p. 198 - 200. 1977.

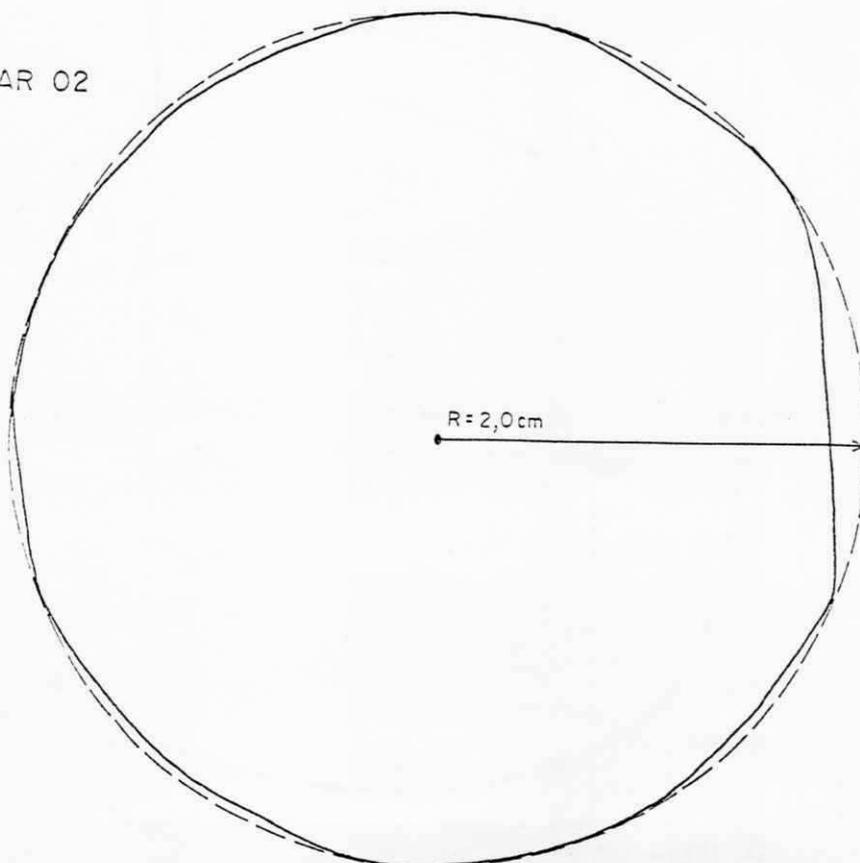
A P É N D I C E A

F I G U R A 1A - Projeção de exemplares para cálculo de circularidade.

EXEMPLAR 01

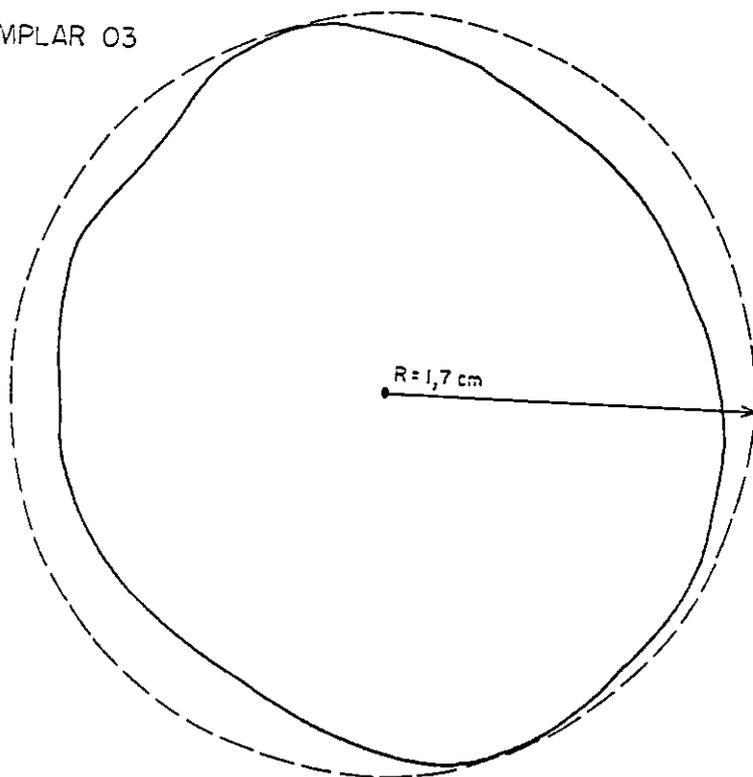


EXEMPLAR 02

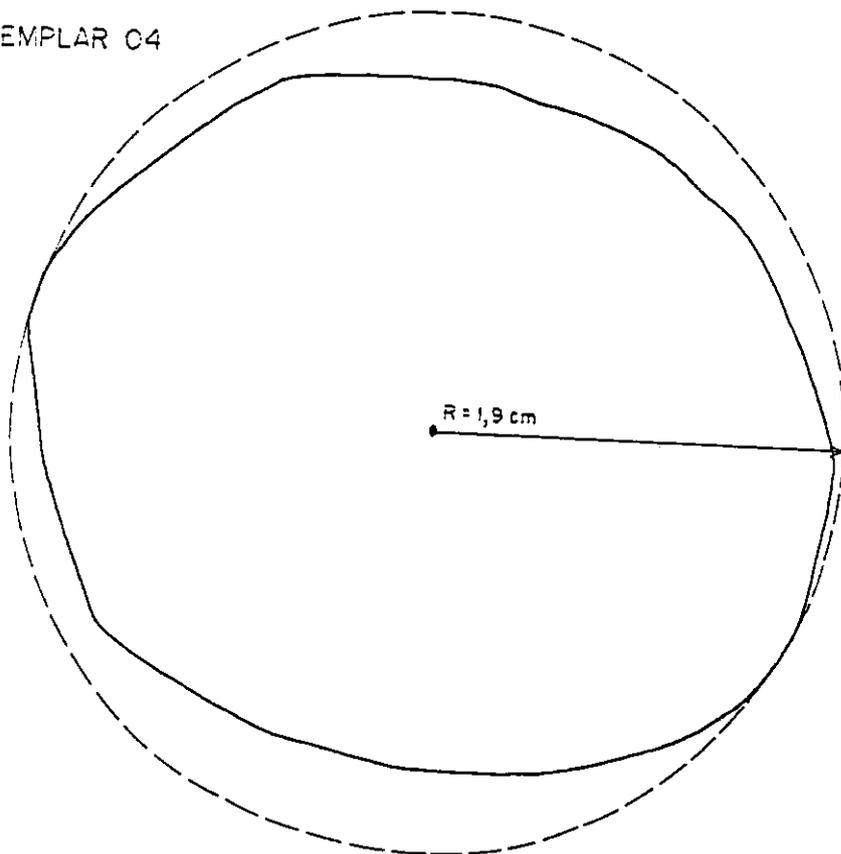


F I G U R A 2A - Projeção de exemplares para cálculo de circularidade.

EXEMPLAR 03

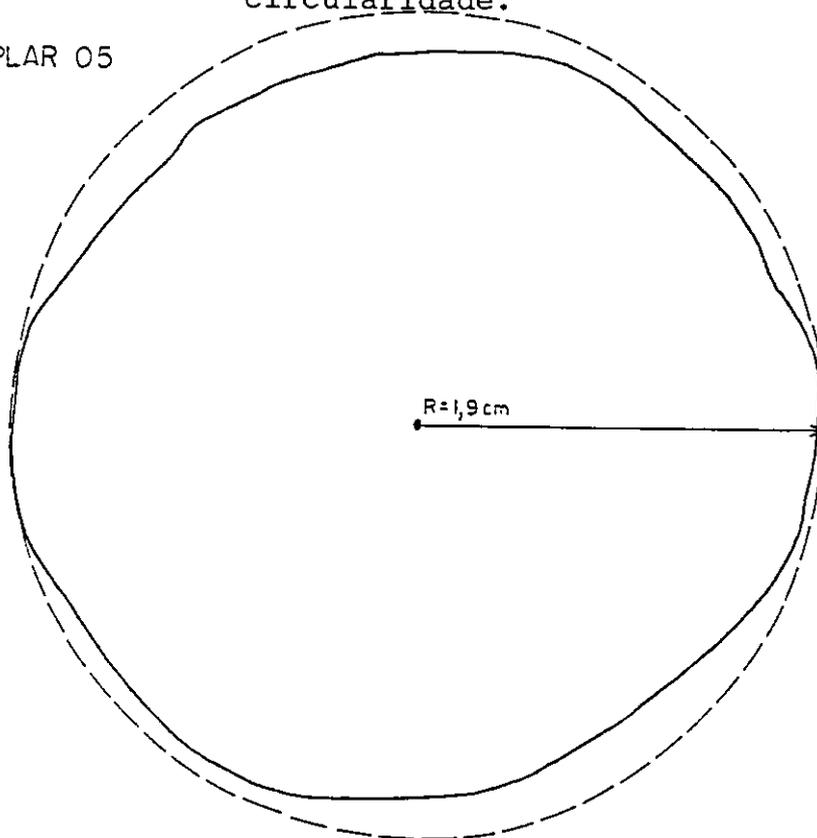


EXEMPLAR 04

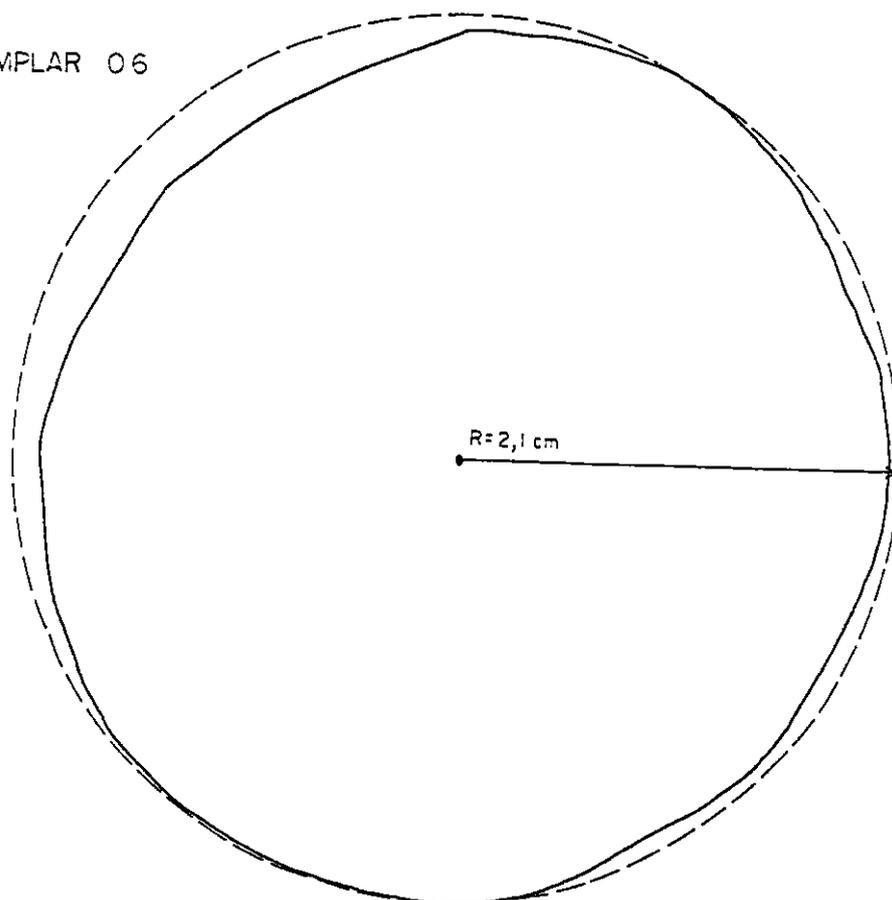


F I G U R A 3A - Projeção de exemplares para cálculo de circularidade.

EXEMPLAR 05

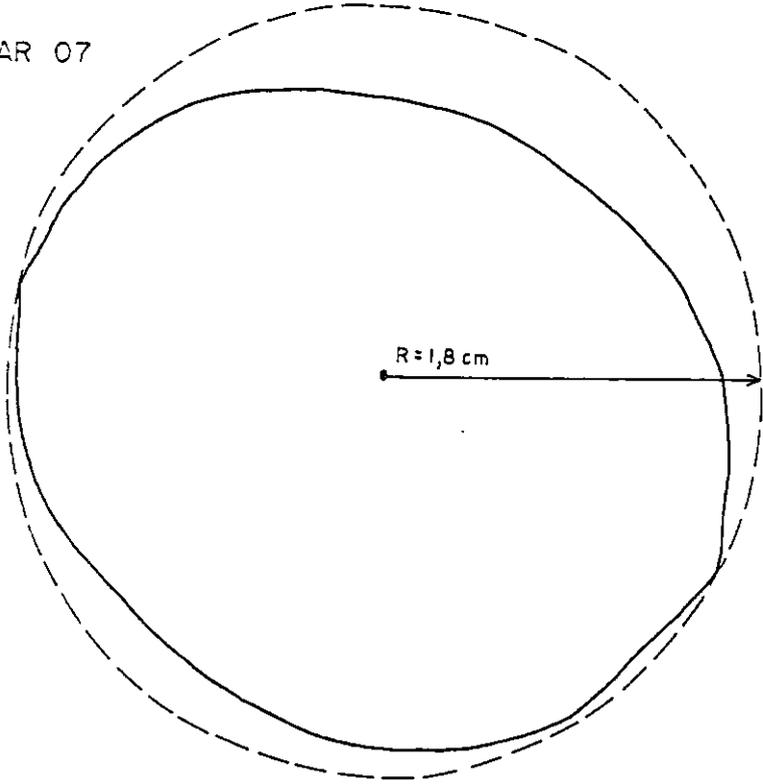


EXEMPLAR 06

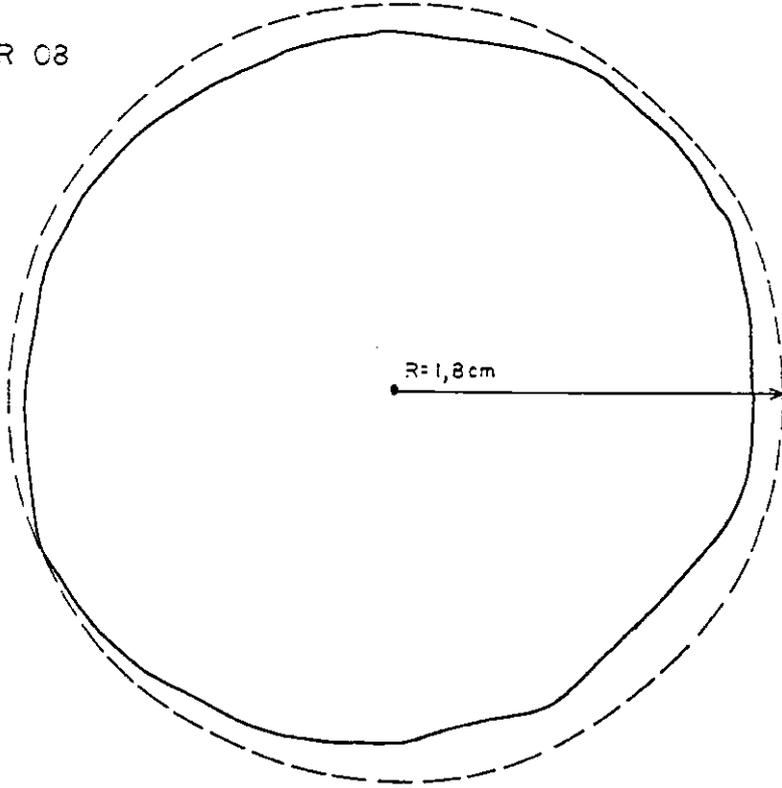


F I G U R A 4A - Projeção de exemplares para cálculo de circularidade.

EXEMPLAR 07

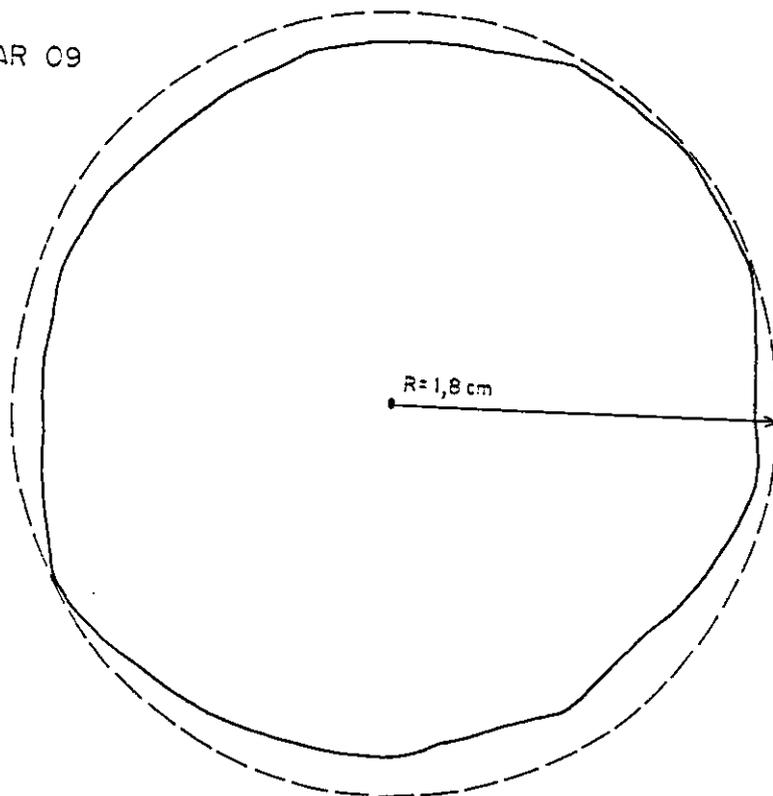


EXEMPLAR 08

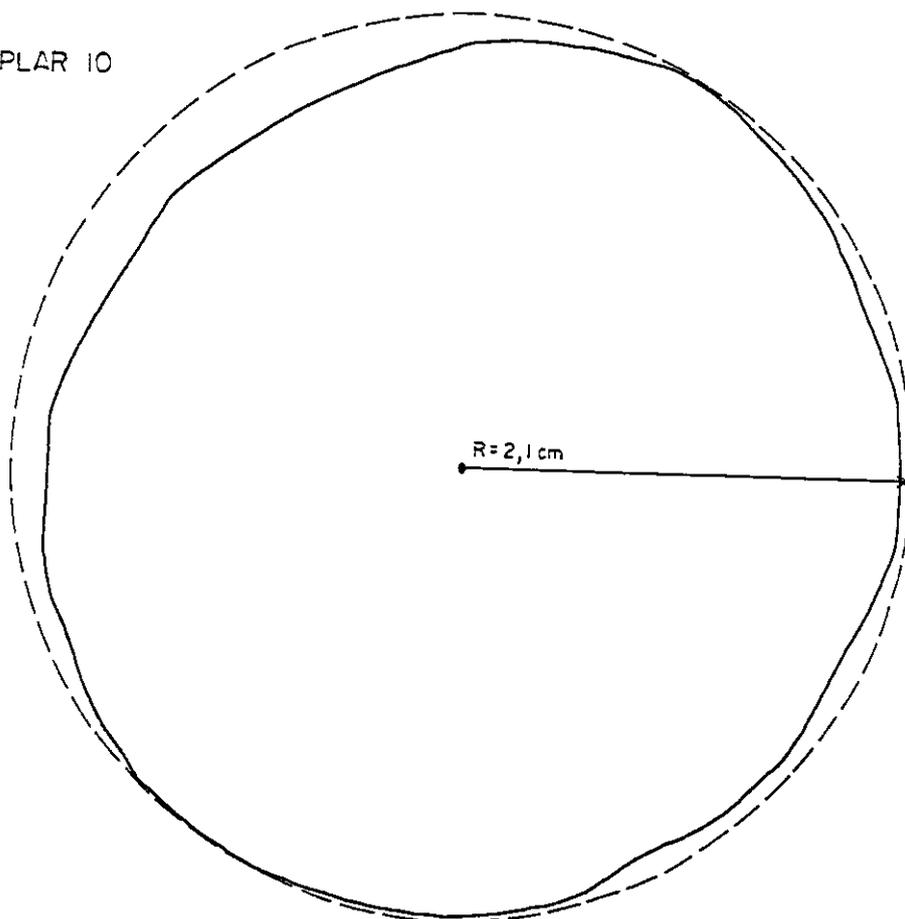


F I G U R A 5A - Projeção de exemplares para cálculo circularidade.

EXEMPLAR 09

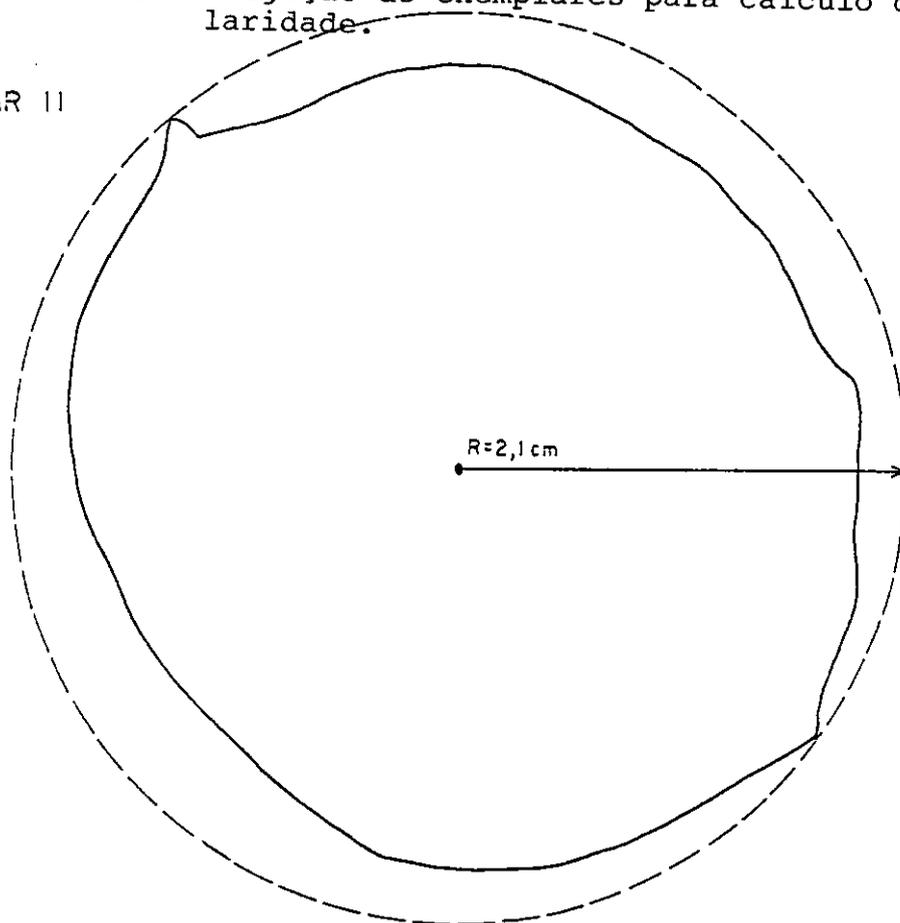


EXEMPLAR 10

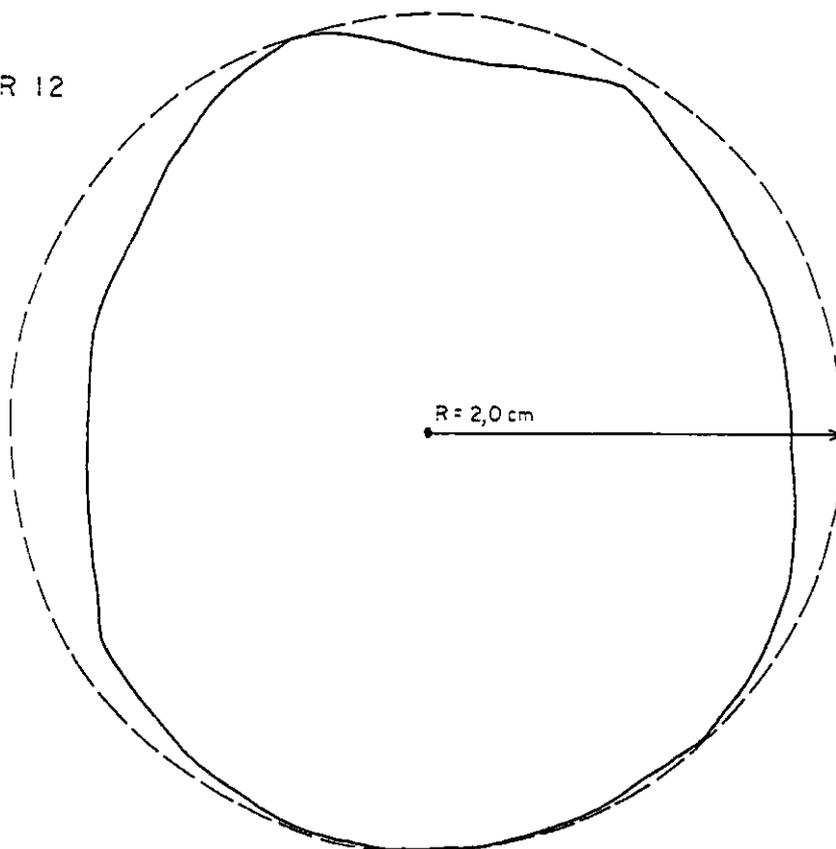


F I G U R A 6A - Projeção de exemplares para cálculo de circularidade.

EXEMPLAR 11

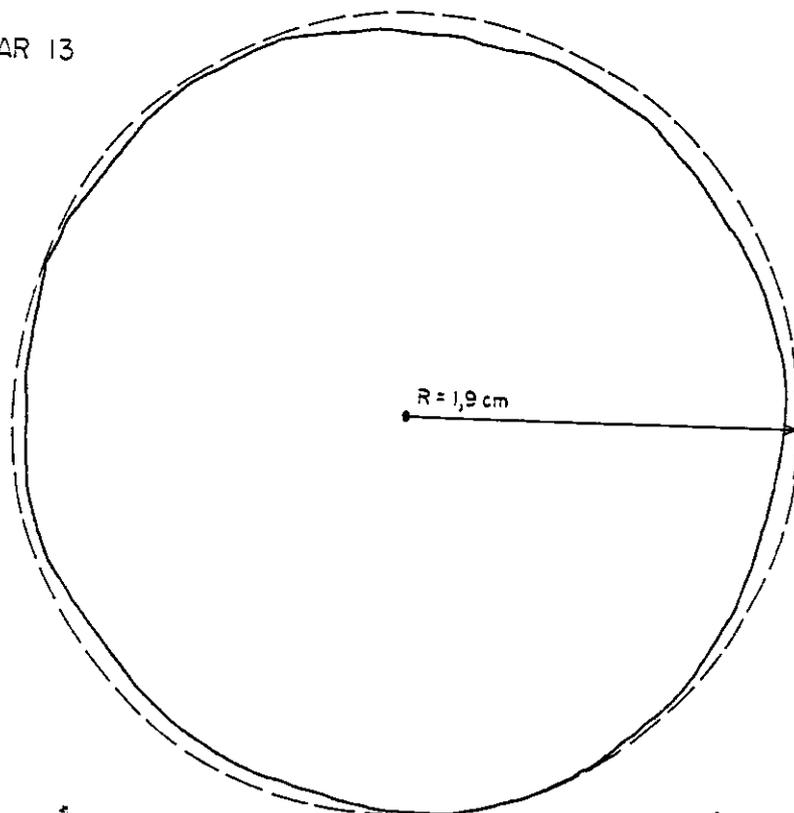


EXEMPLAR 12

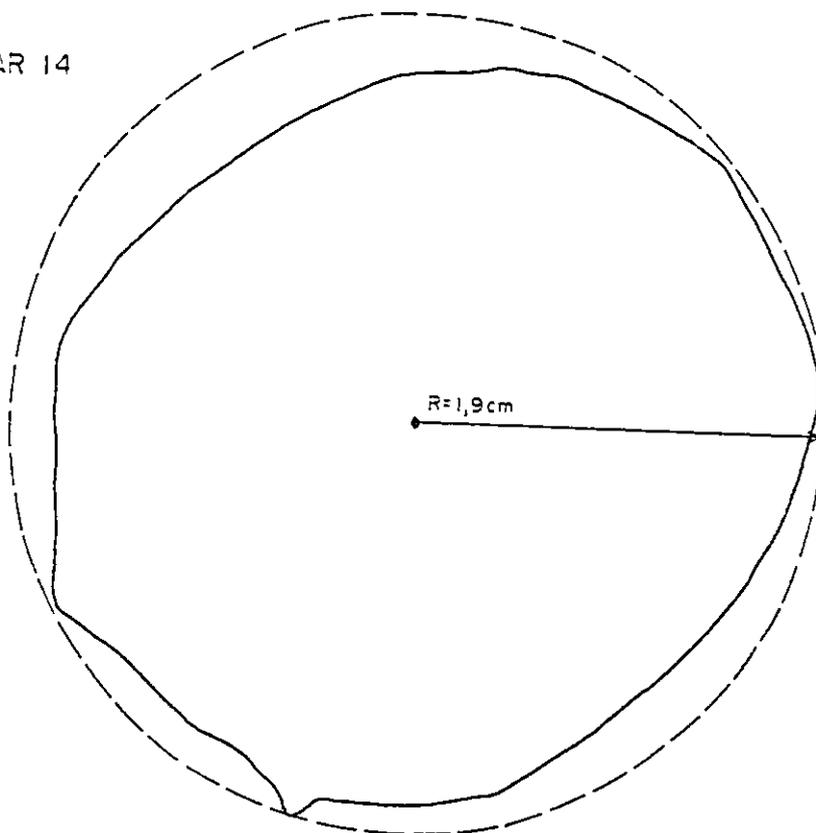


F I G U R A 7A - Projeção de exemplares para cálculo de circularidade.

EXEMPLAR 13

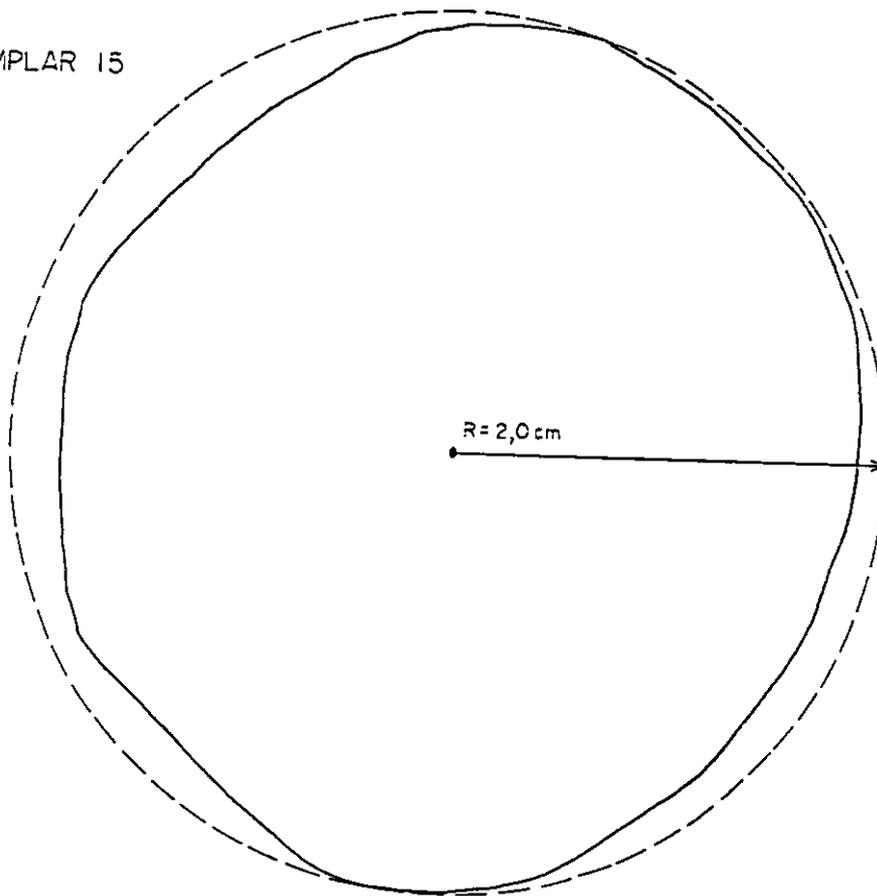


EXEMPLAR 14



F I G U R A 8A - Projeção de exemplares para cálculo de circularidade.

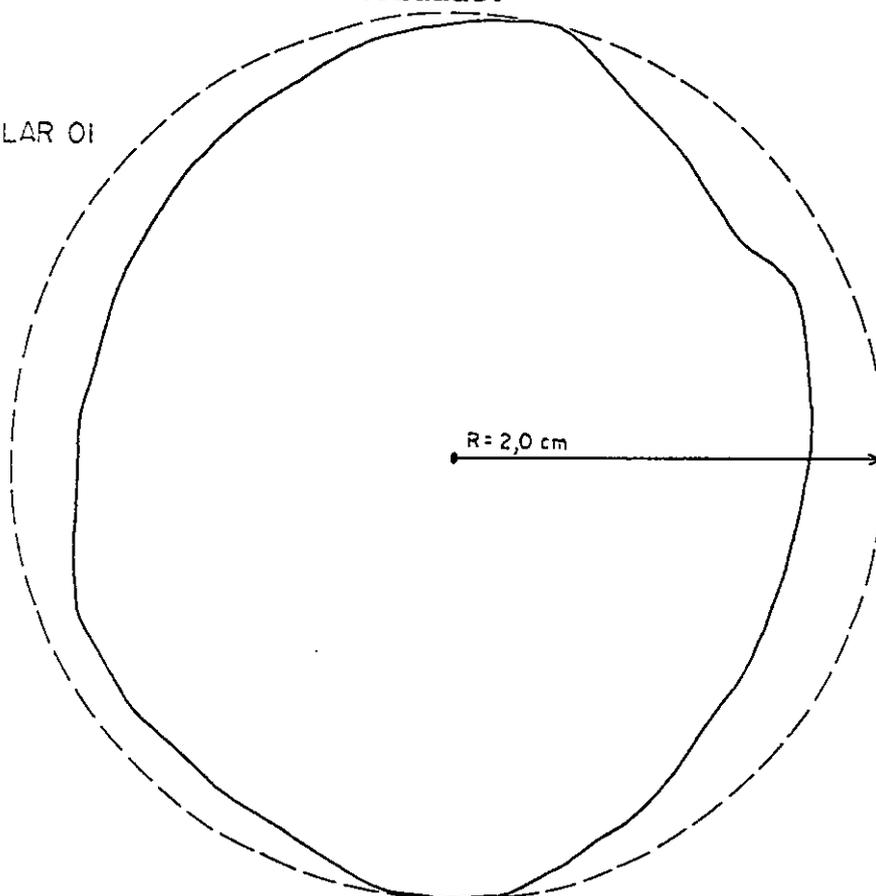
EXEMPLAR 15



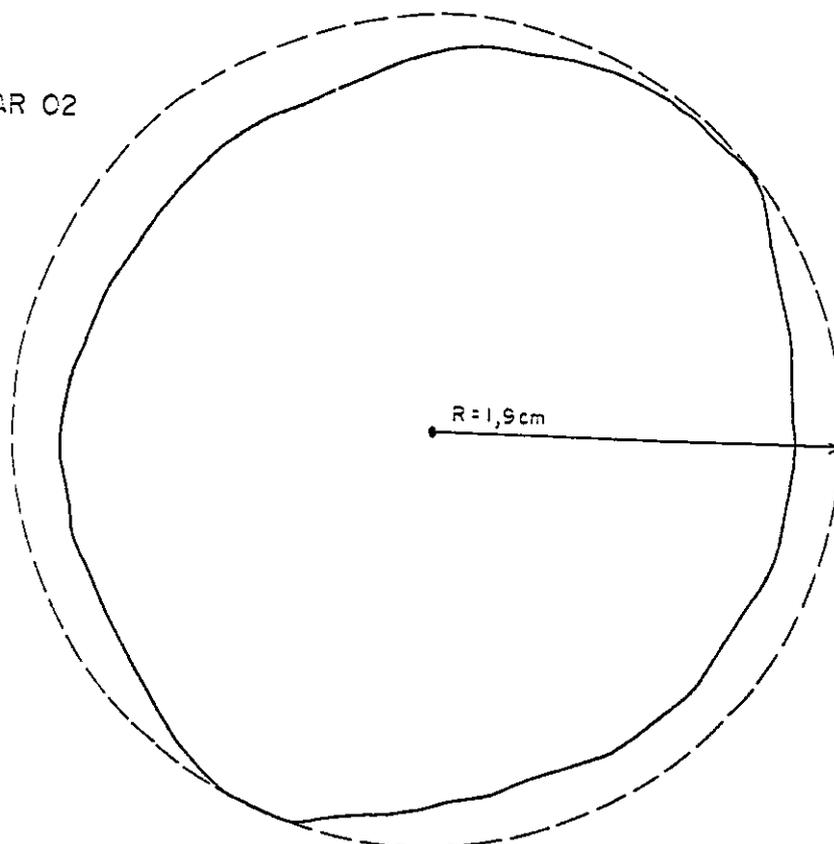
APÉNDICE B

F I G U R A 1B - Projeção de exemplares para cálculo de esfericidade.

EXEMPLAR 01

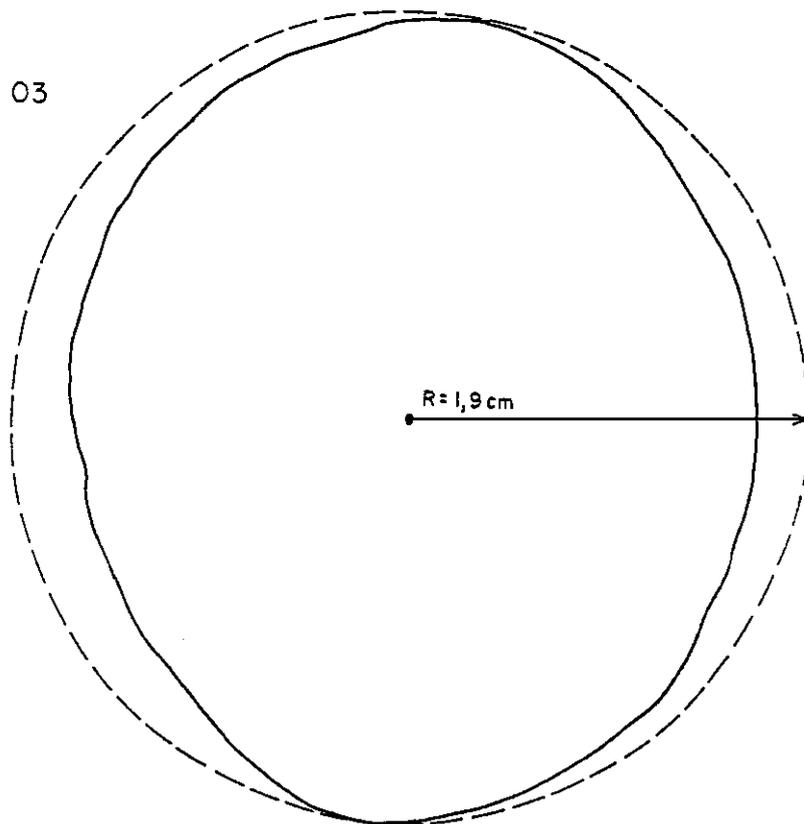


EXEMPLAR 02

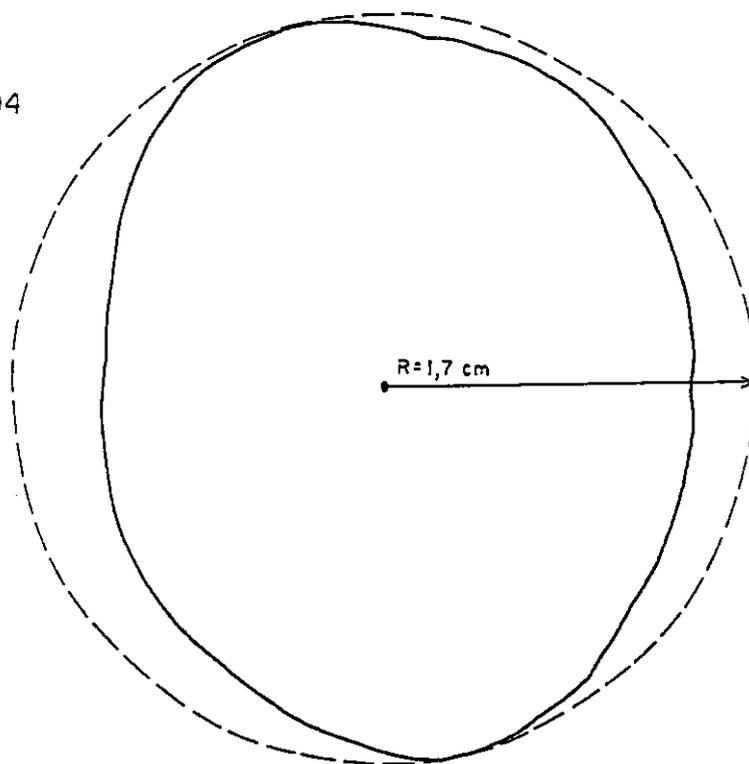


F I G U R A 2B - Projeção de exemplares para cálculo de esfericidade.

EXEMPLAR 03

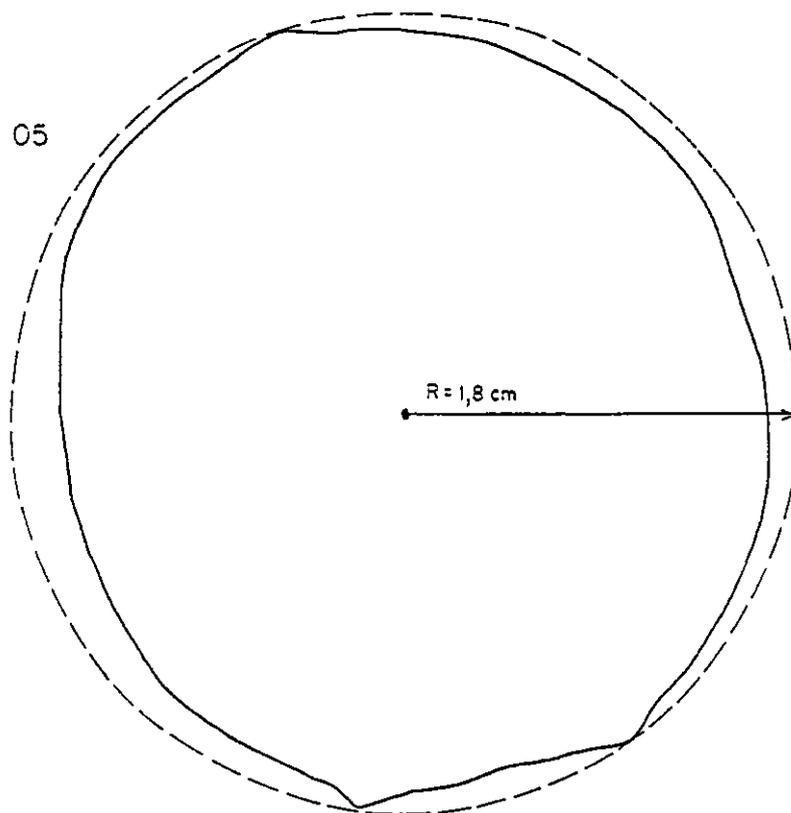


EXEMPLAR 04

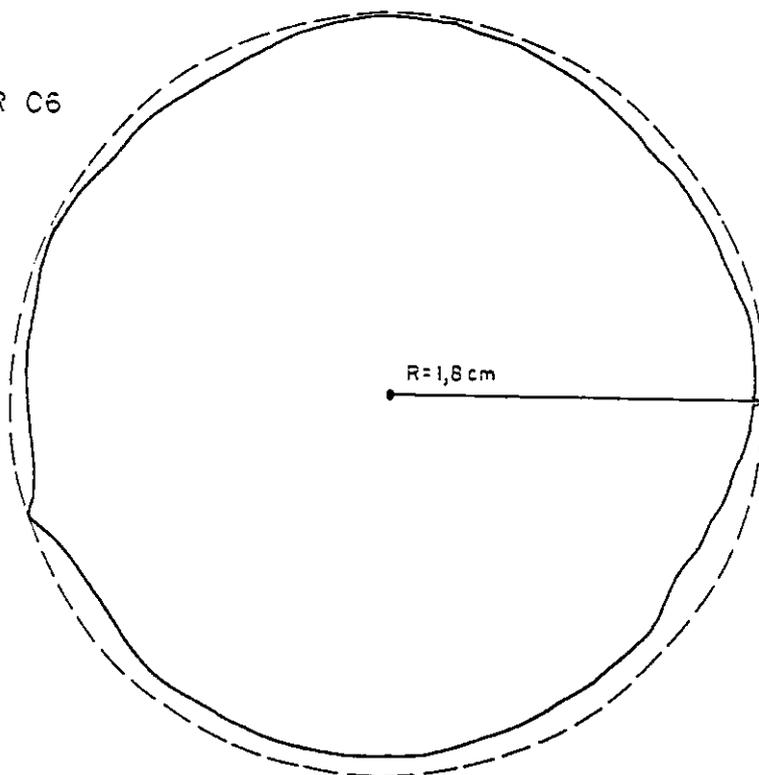


F I G U R A 3B - Projeção de exemplares para cálculo de esfericidade.

EXEMPLAR 05

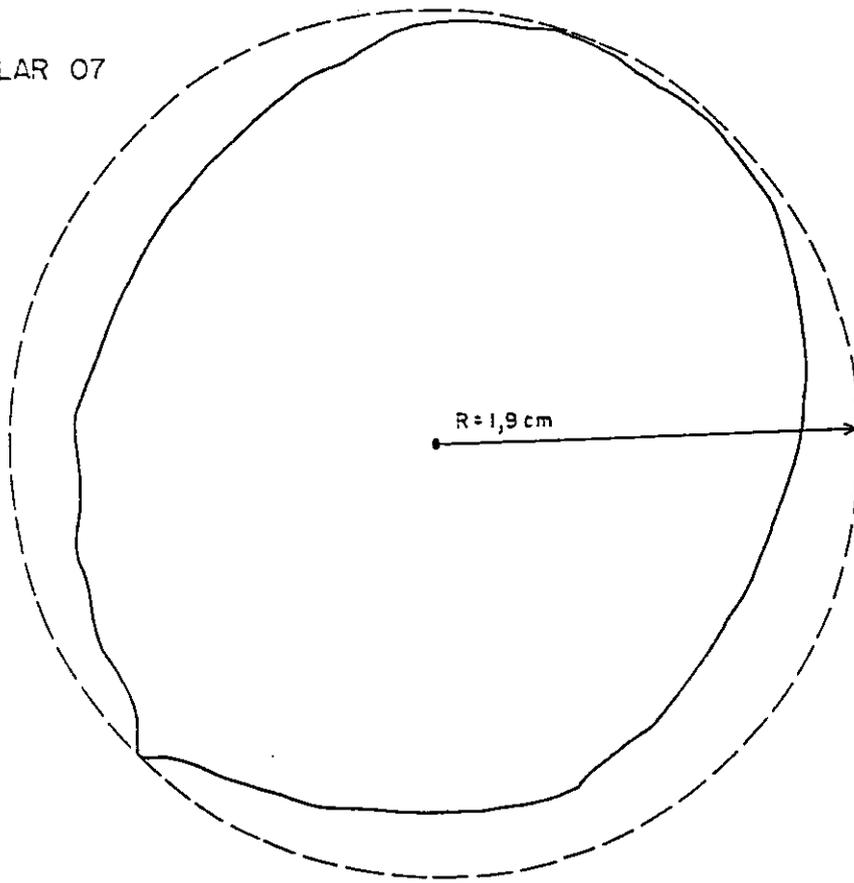


EXEMPLAR 06

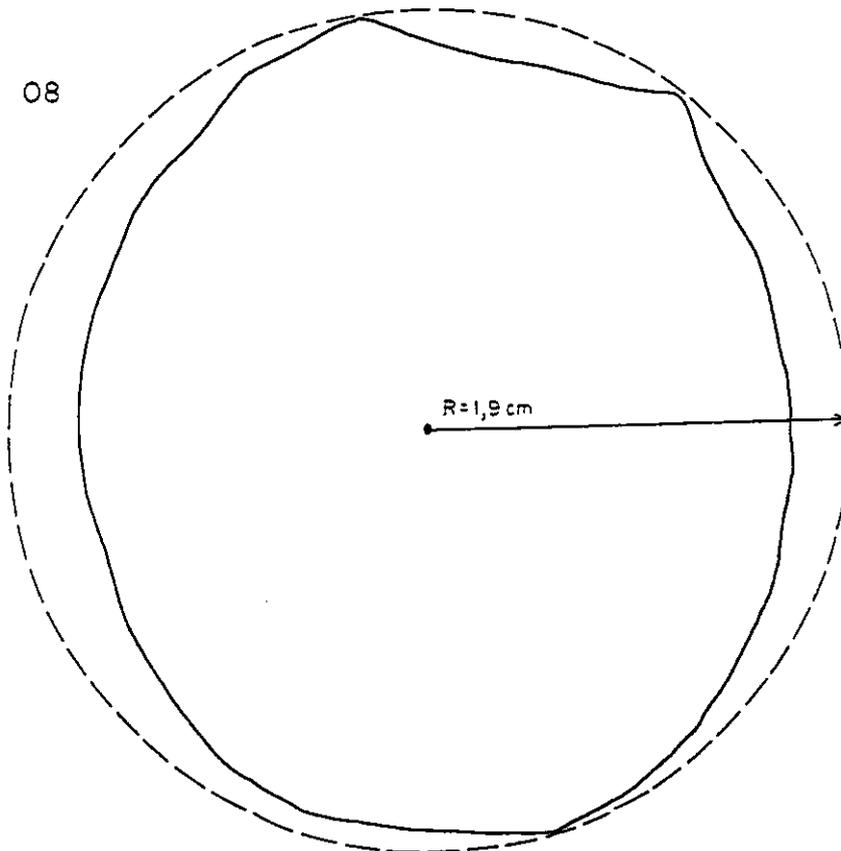


F I G U R A 4B - Projeção de exemplares para cálculo de esfericidade.

EXEMPLAR 07

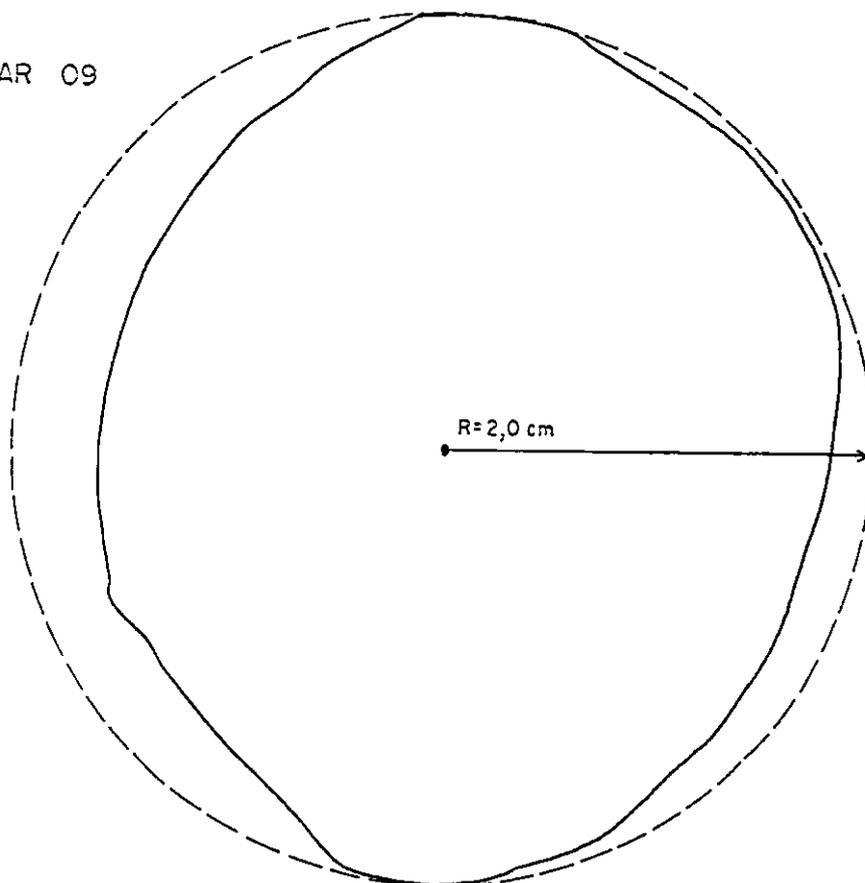


EXEMPLAR 08

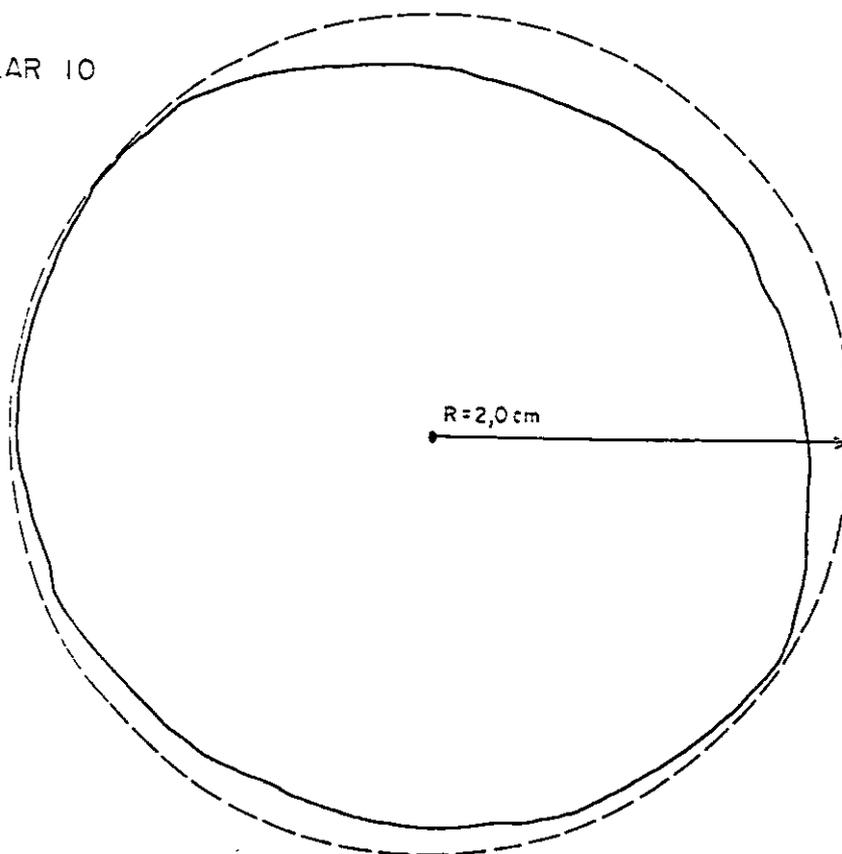


F I G U R A 5B - Projeção de exemplares para cálculo de esfericidade.

EXEMPLAR 09

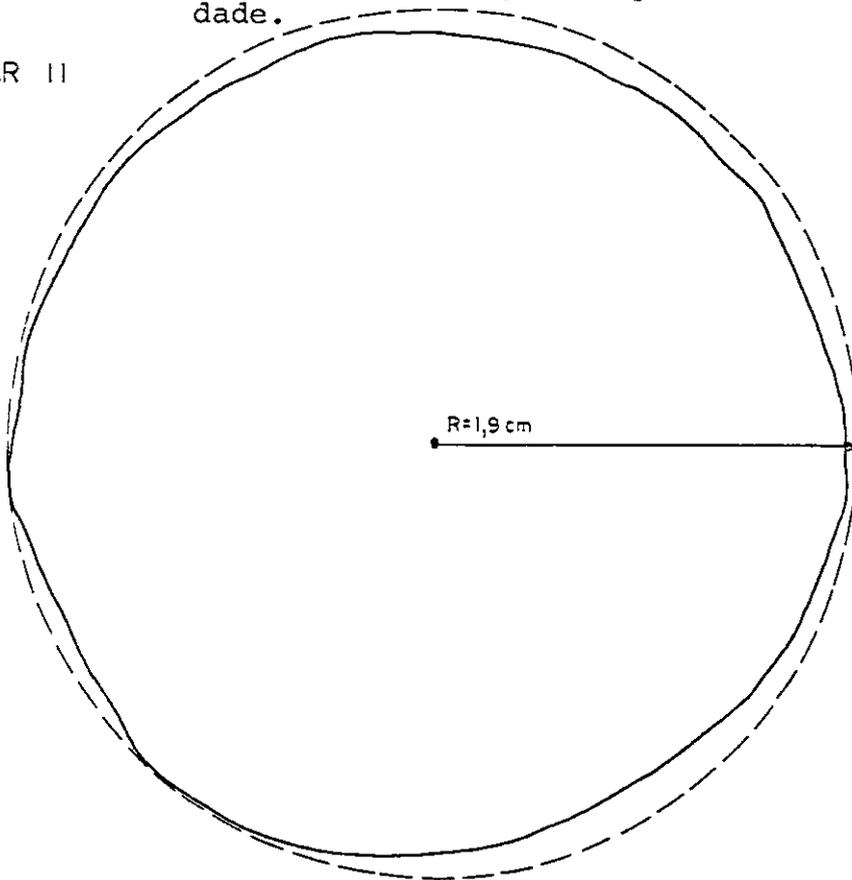


EXEMPLAR 10

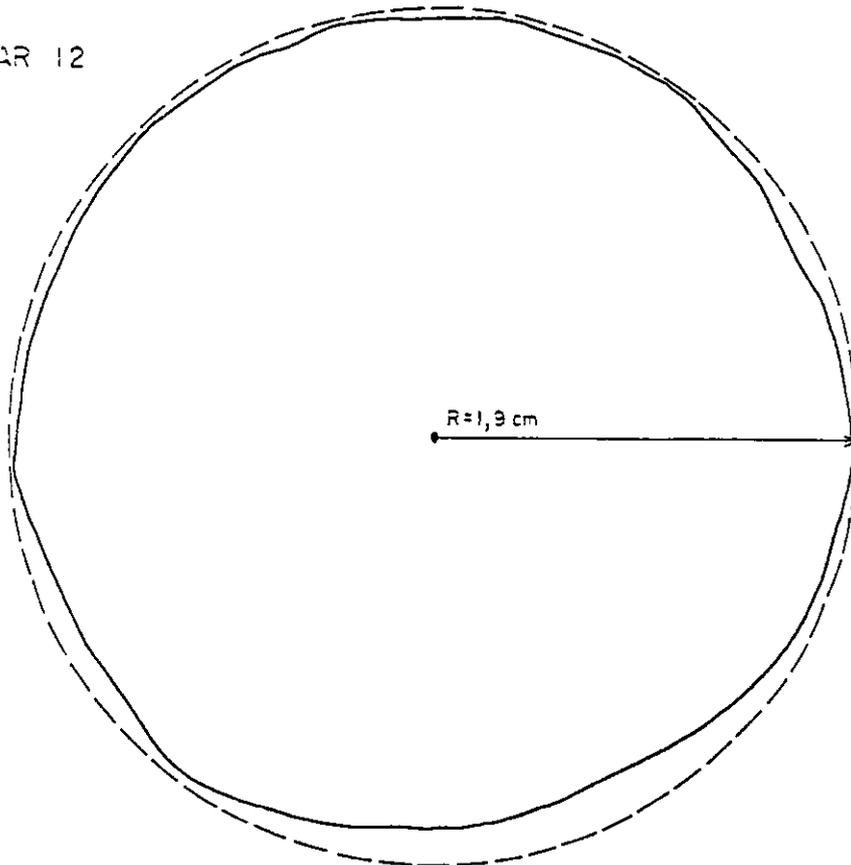


F I G U R A 6B - Projeção de exemplares para cálculo de esfericidade.

EXEMPLAR 11

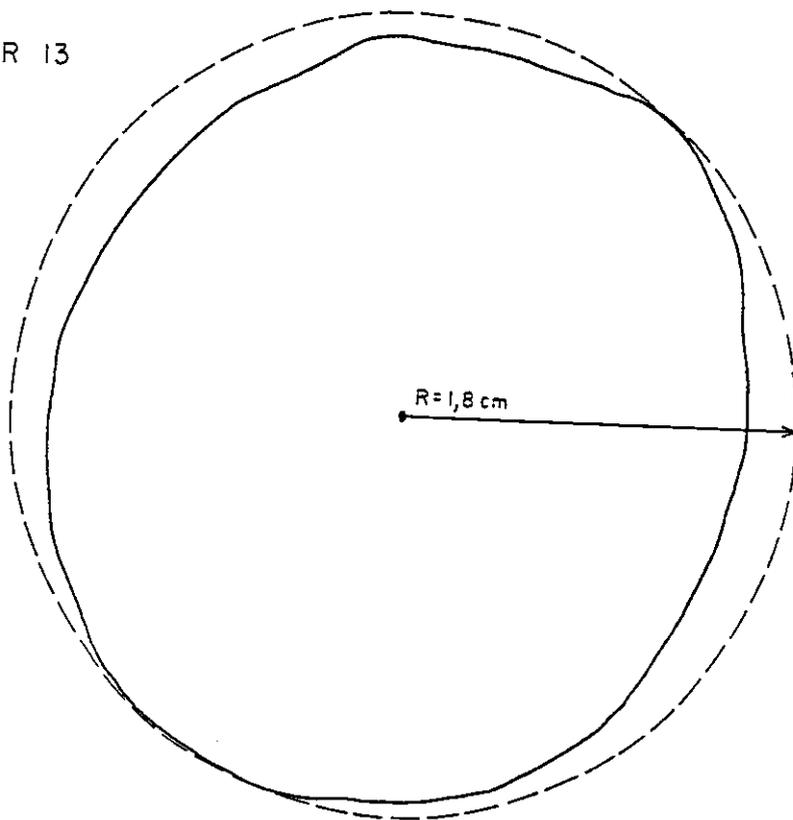


EXEMPLAR 12

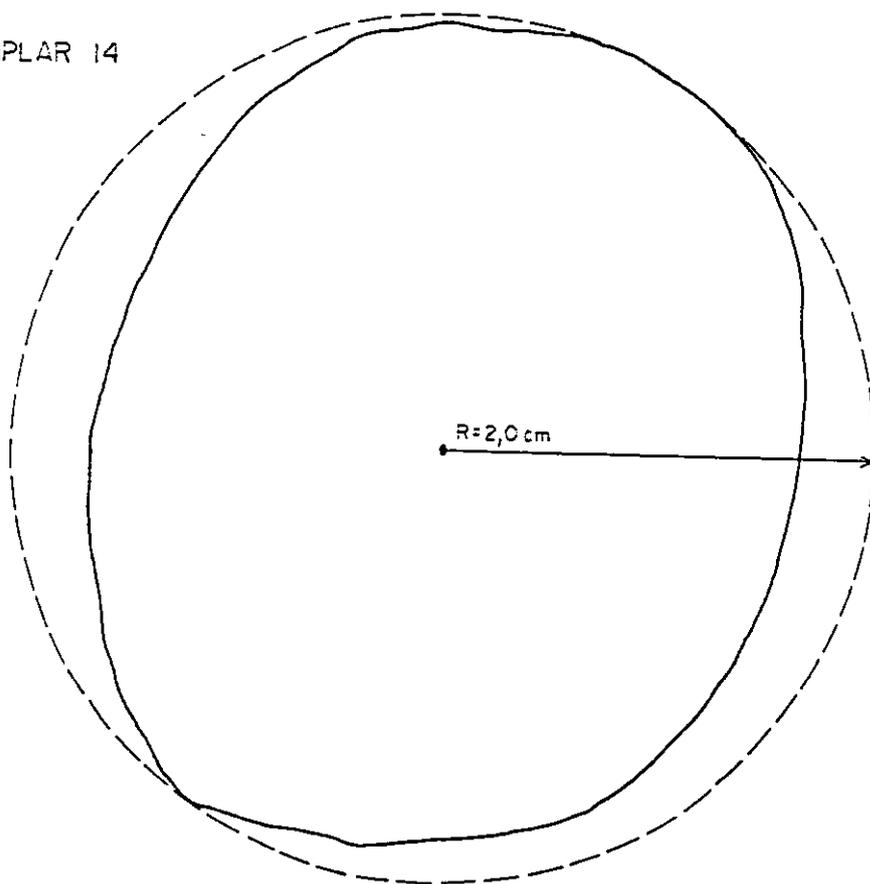


F I G U R A 7B - Projeção de exemplares para cálculo de esfericidade.

EXEMPLAR 13

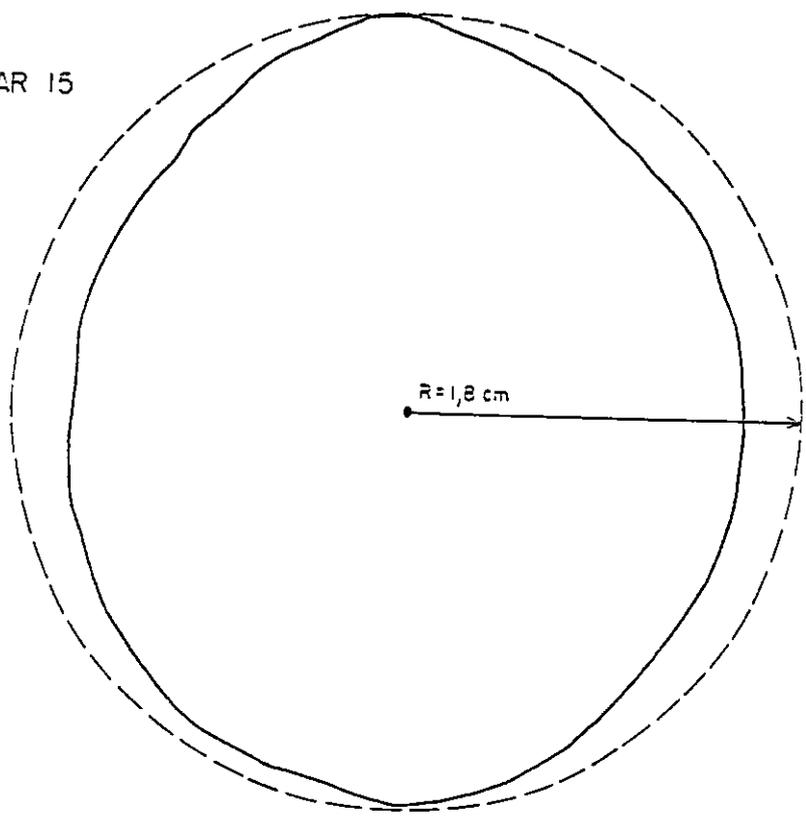


EXEMPLAR 14



F I G U R A 8B - Projeção de exemplares para cálculo de esfericidade.

EXEMPLAR 15



APÉNDICE C

FIGURA 1C

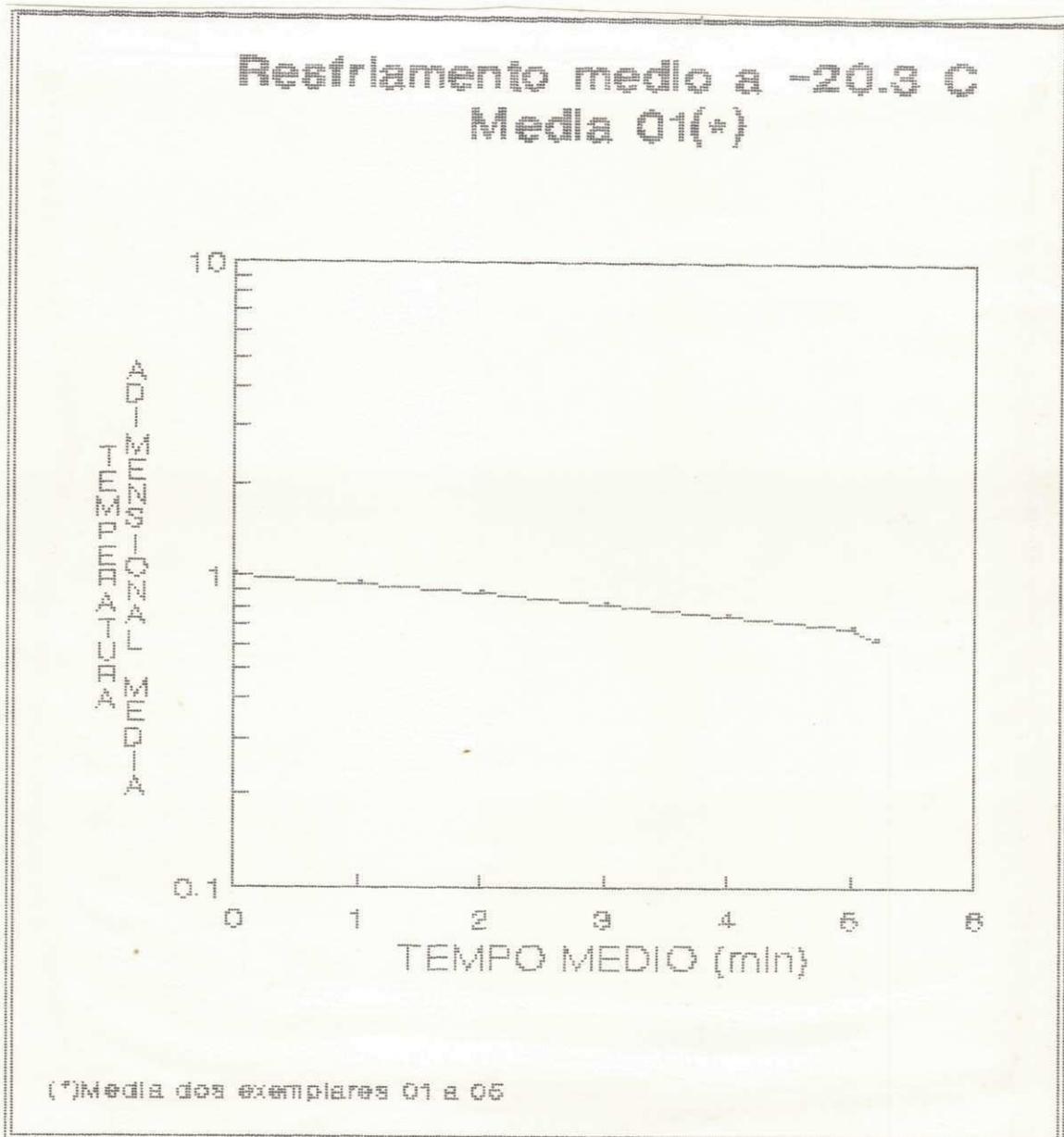


FIGURA 20

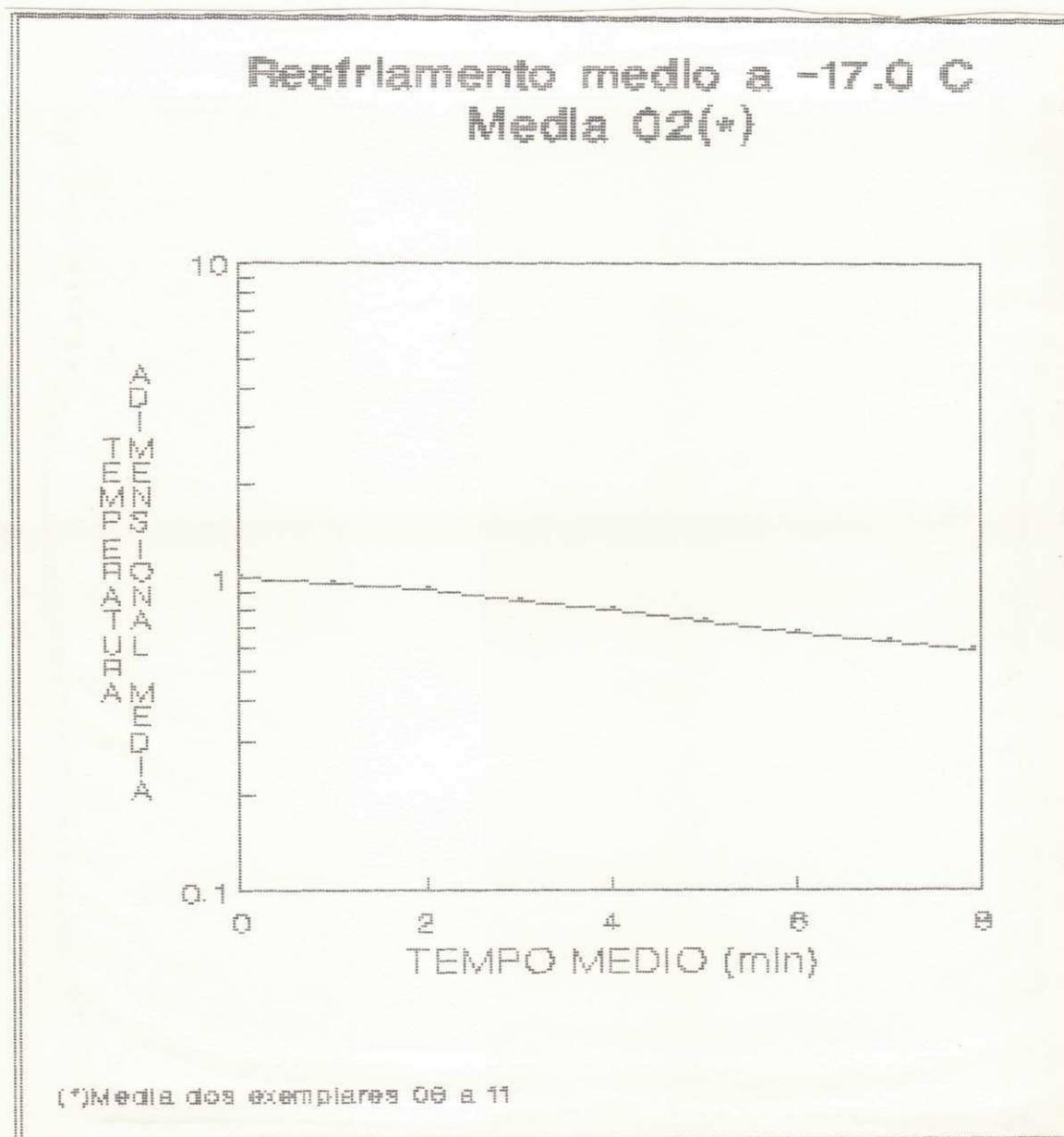


FIGURA 3C

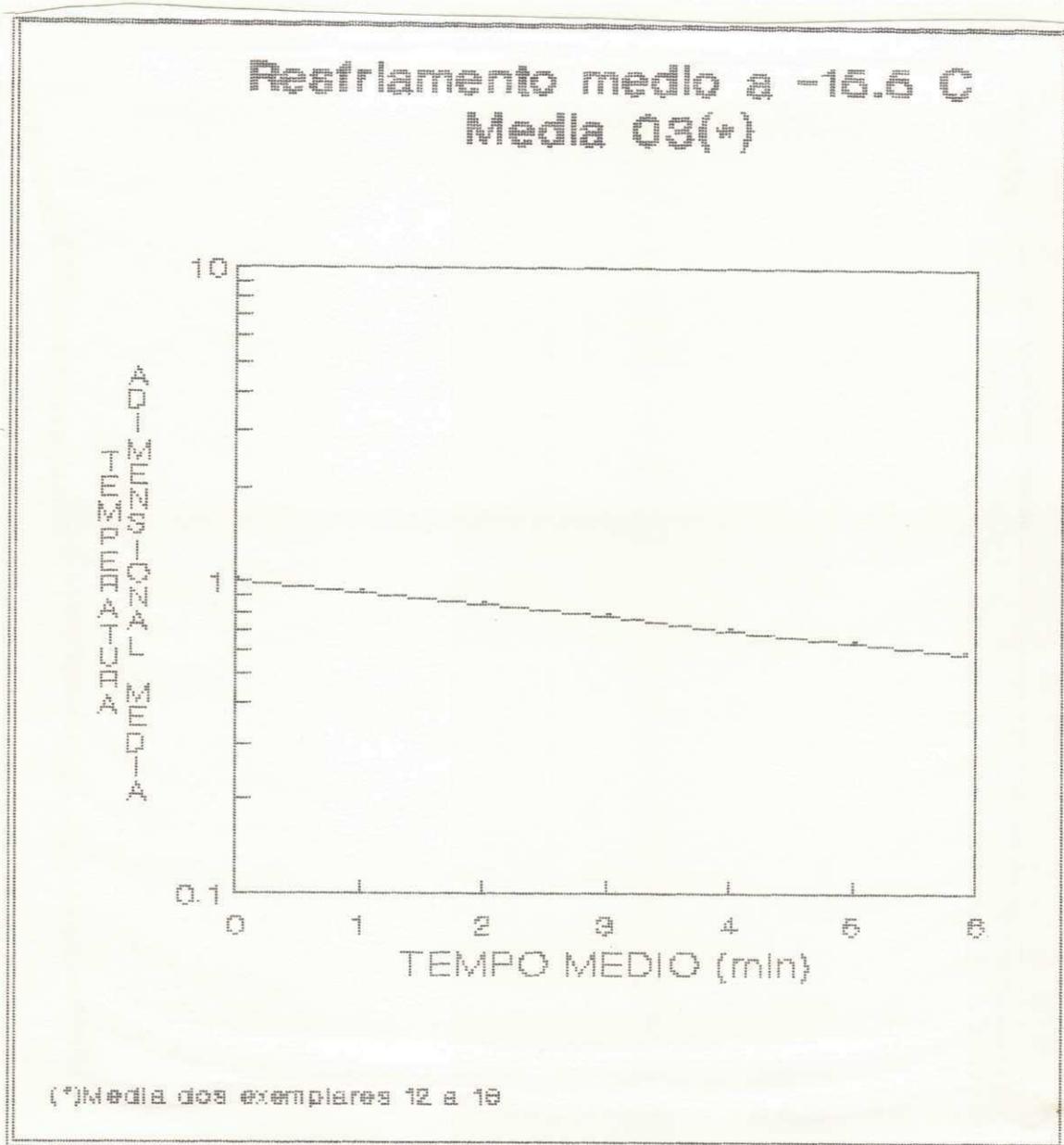


FIGURA 4C

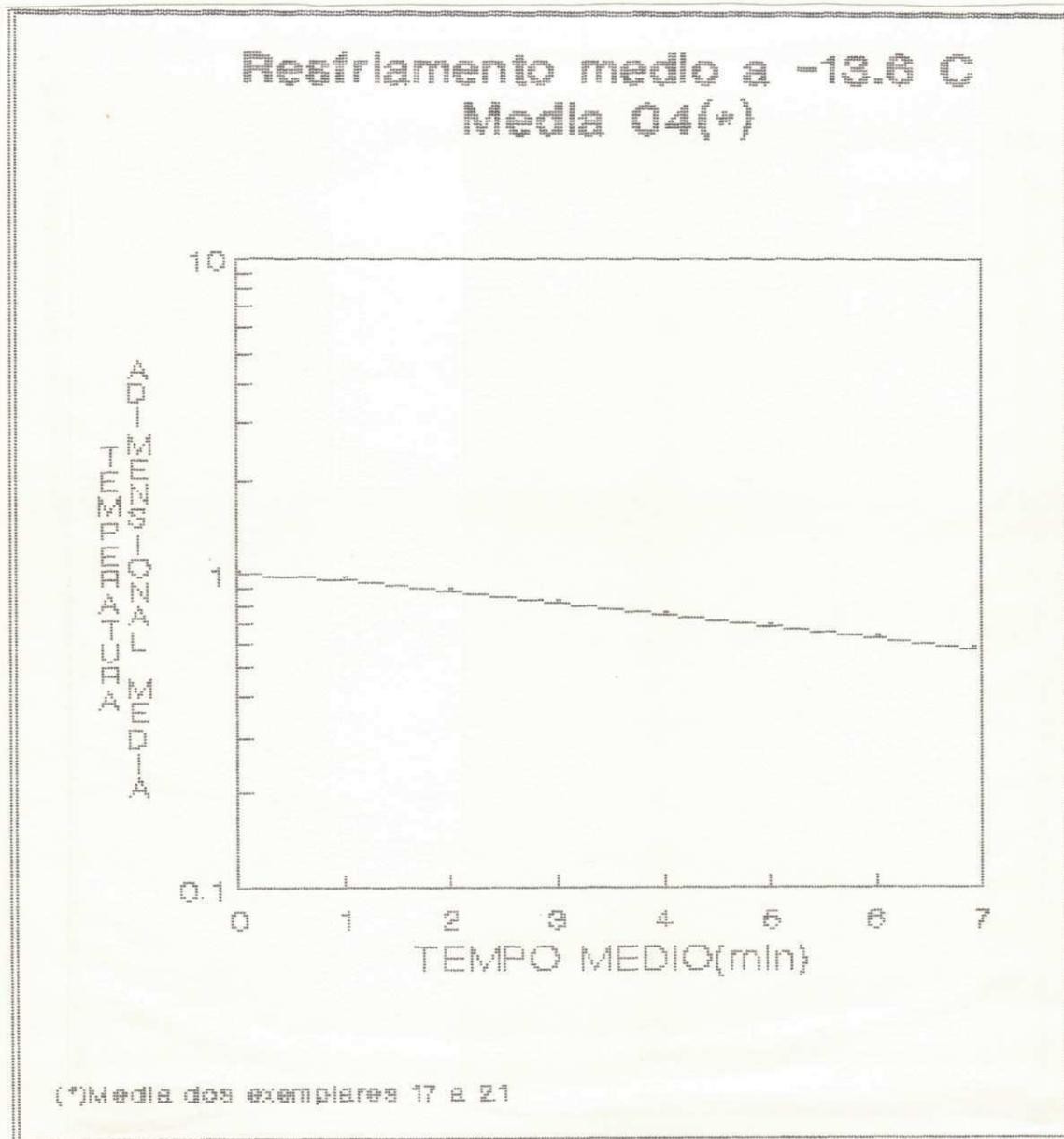


FIGURA 5C

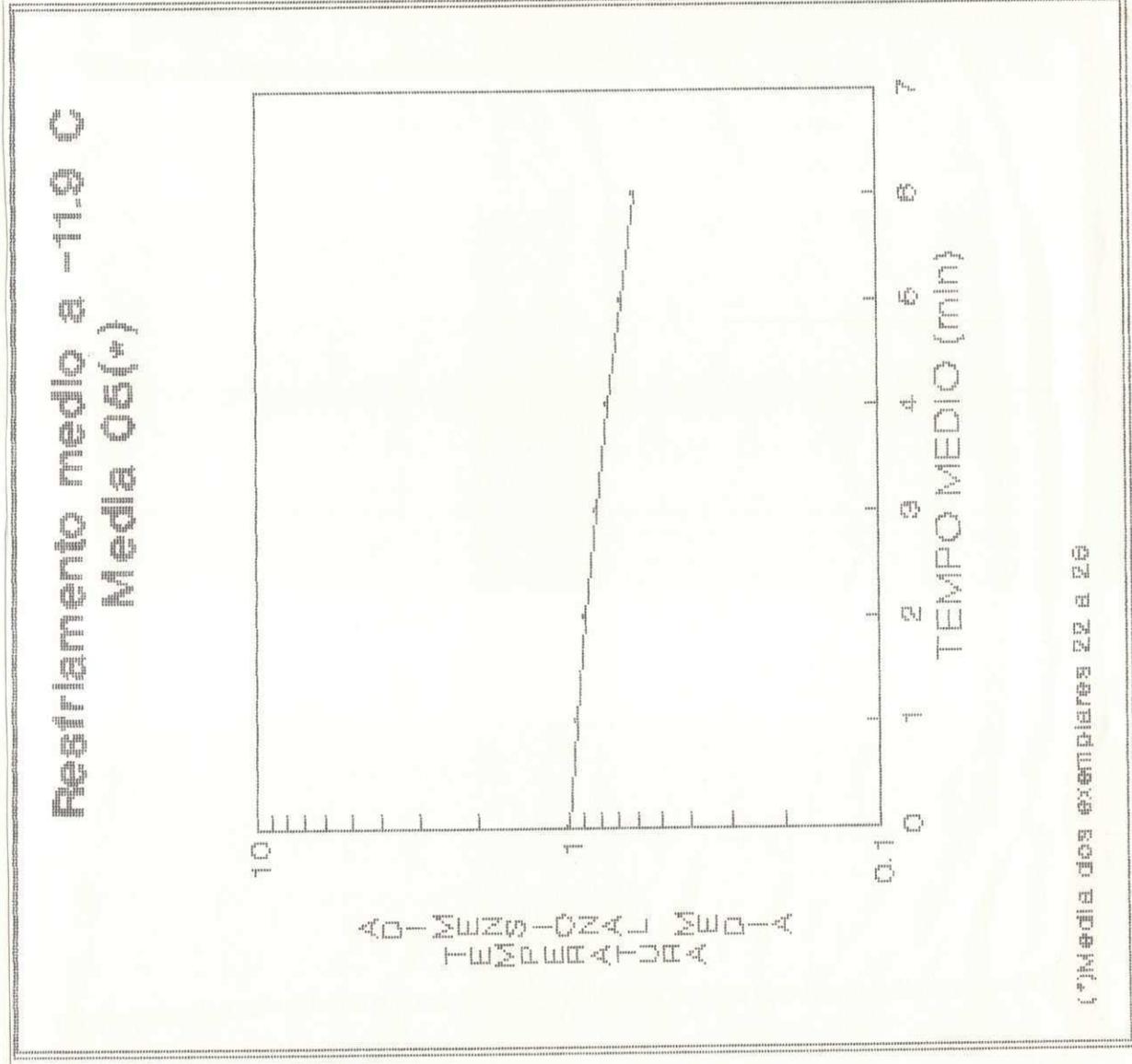


FIGURA 6C

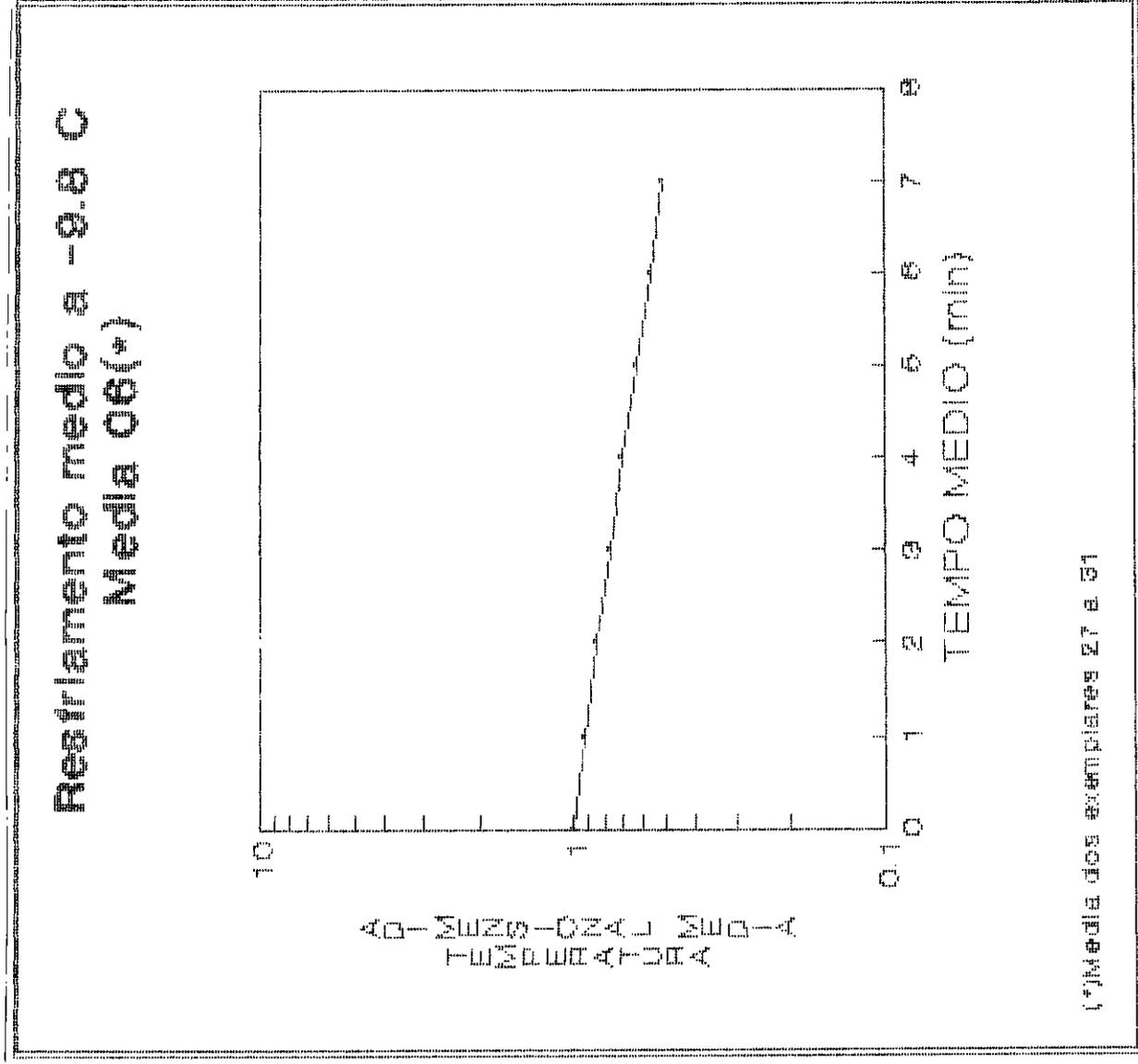


FIGURA 7C

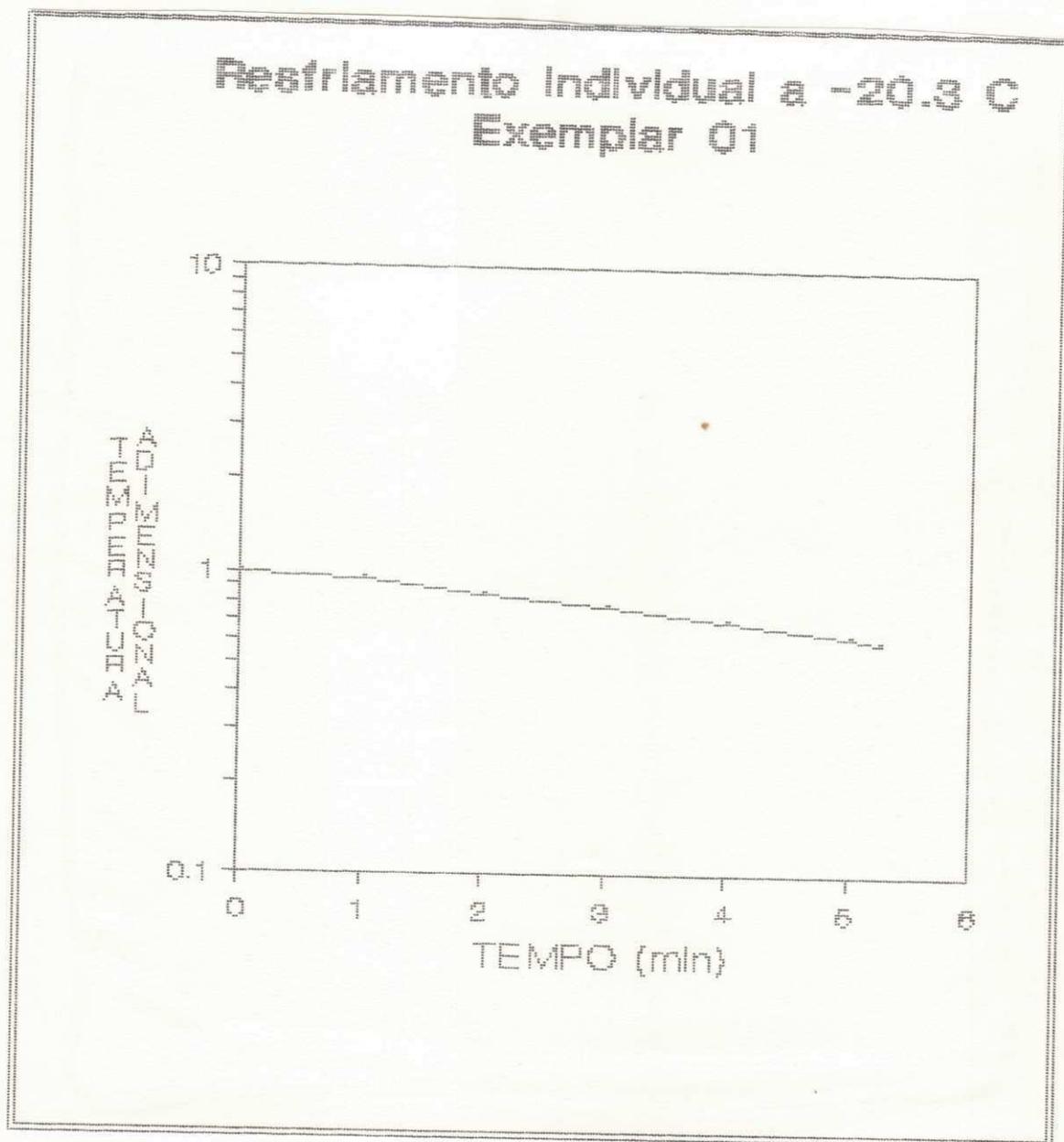
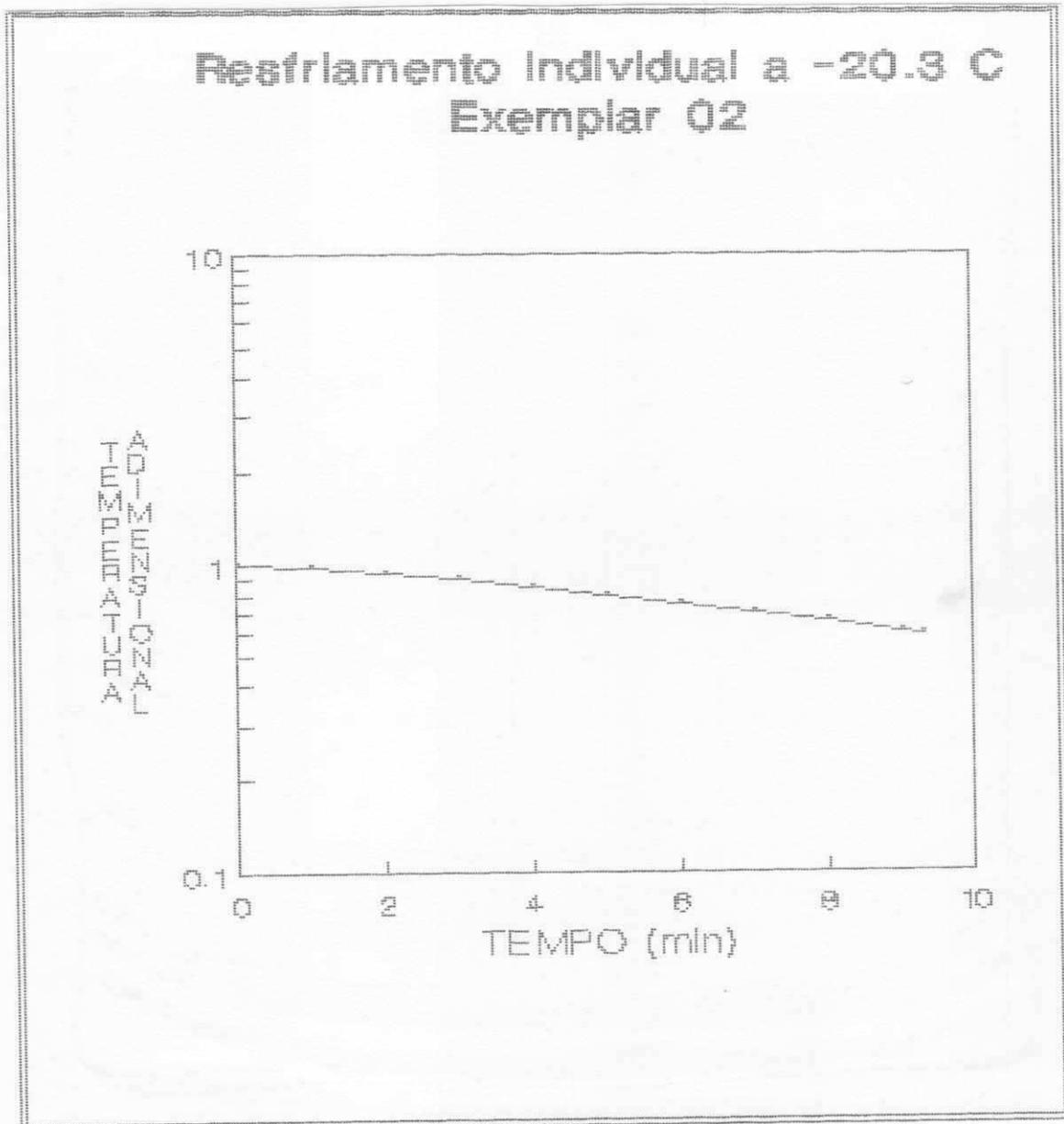


FIGURA 8C



F I G U R A 90

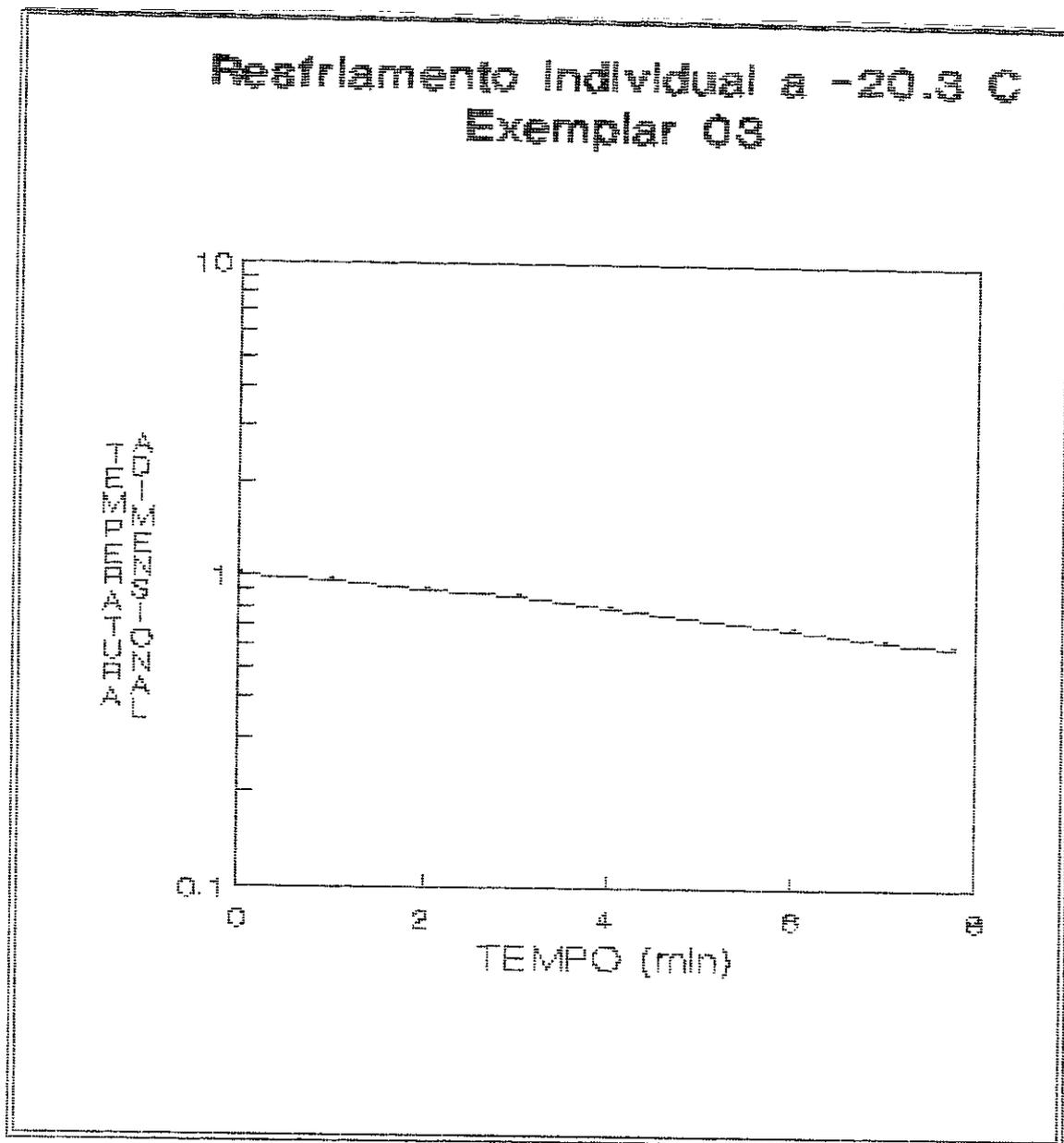
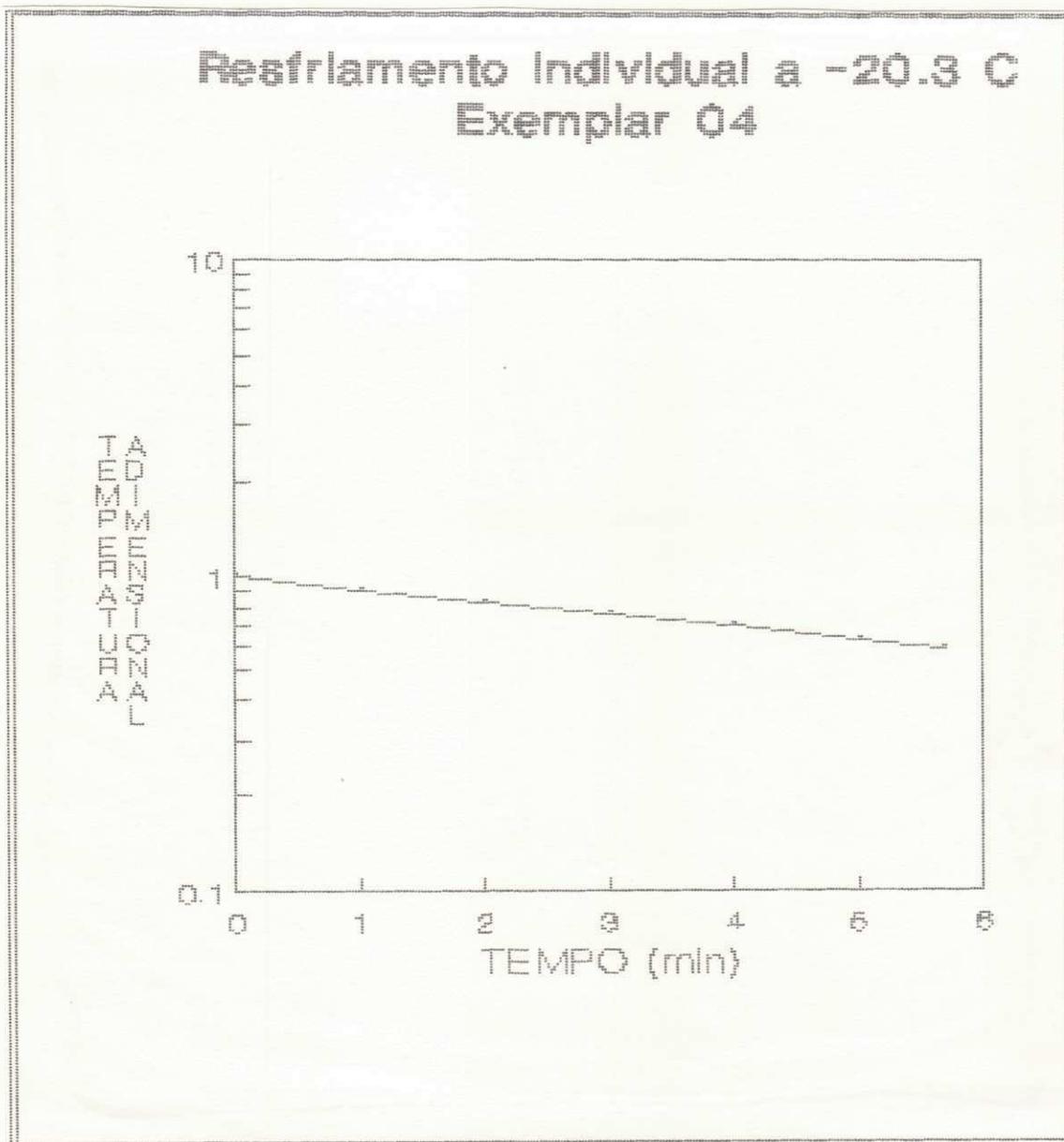
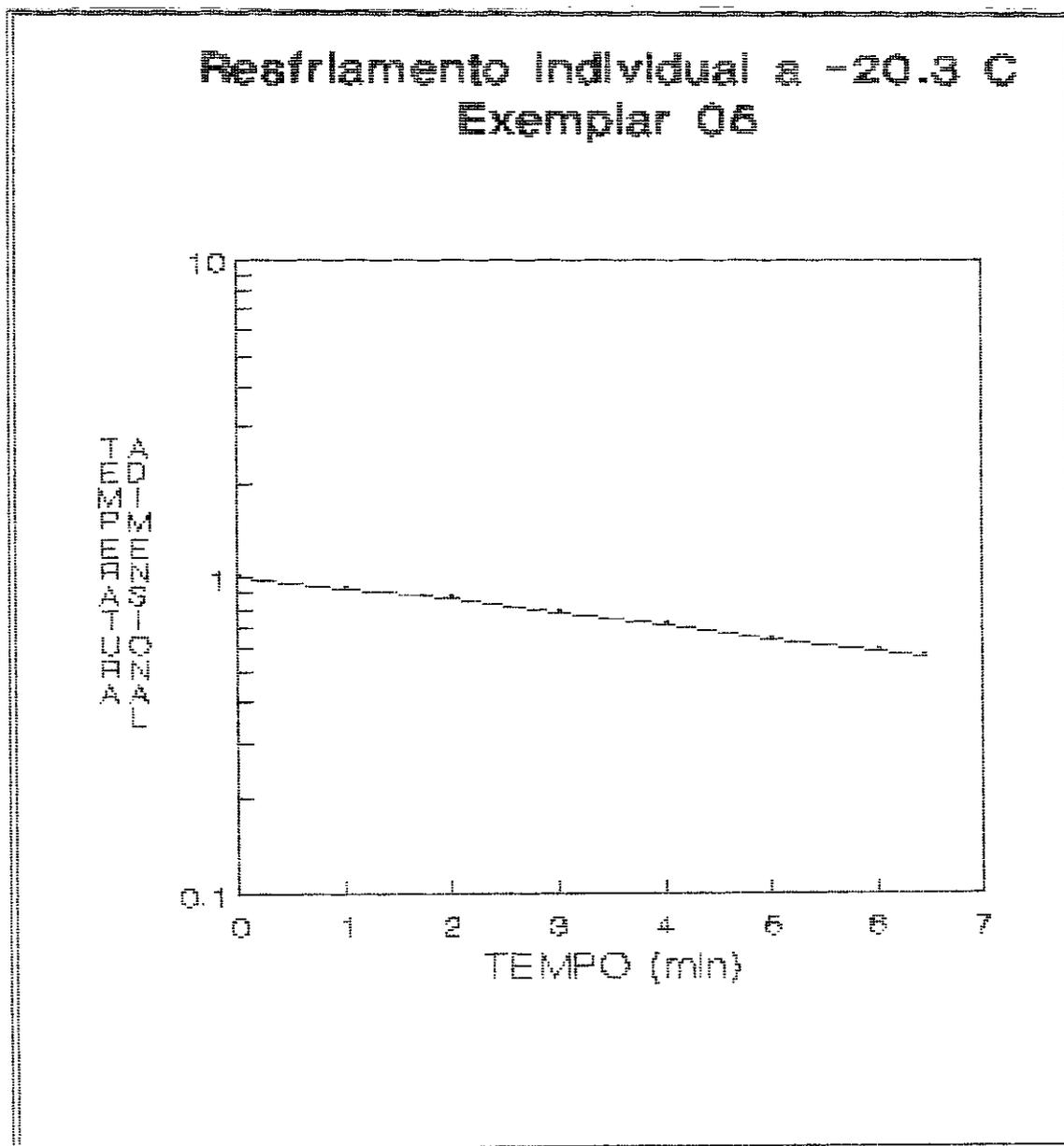


FIGURA 10C



F I G U R A 110



F I G U R A 120

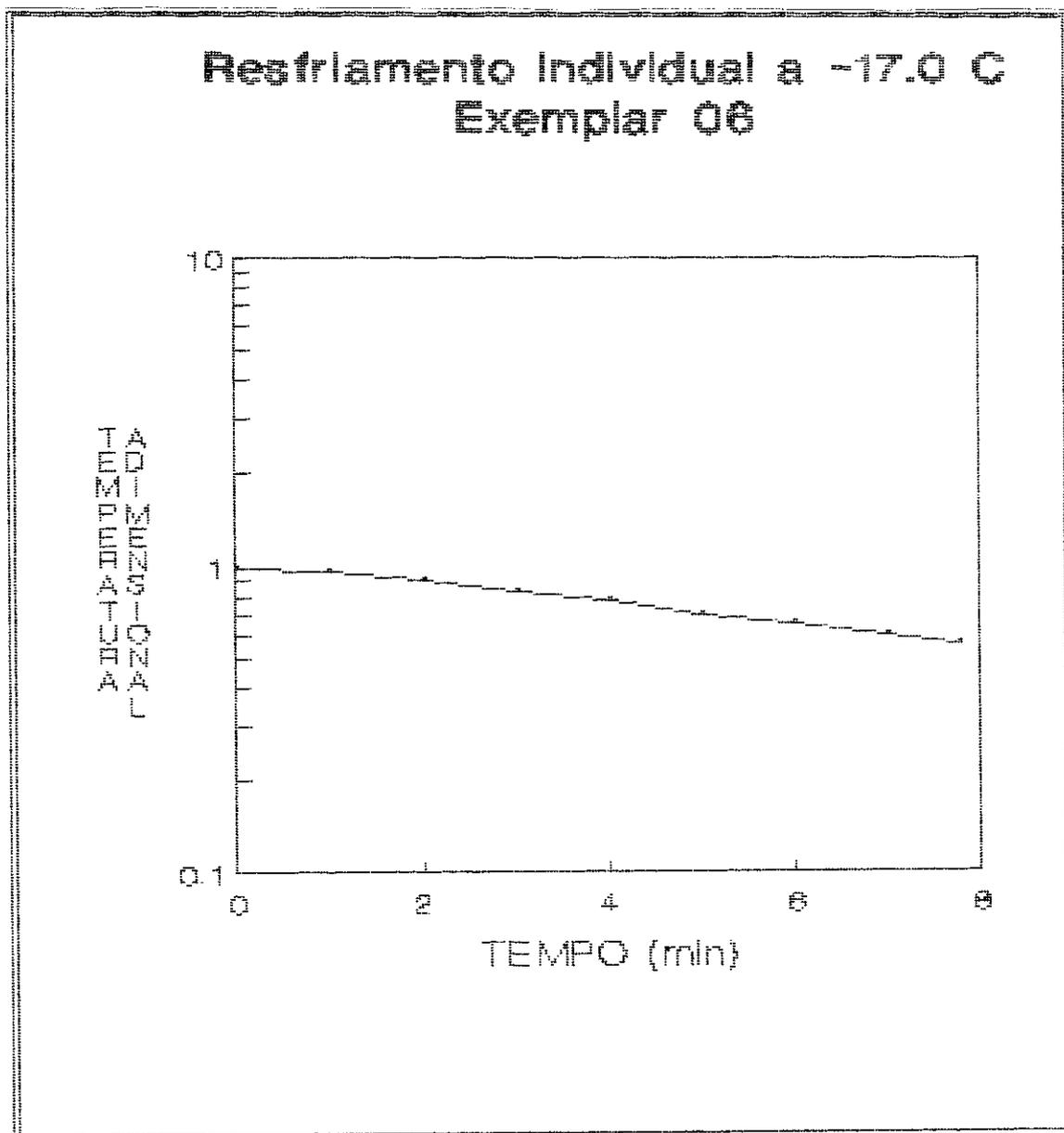


FIGURA 13C

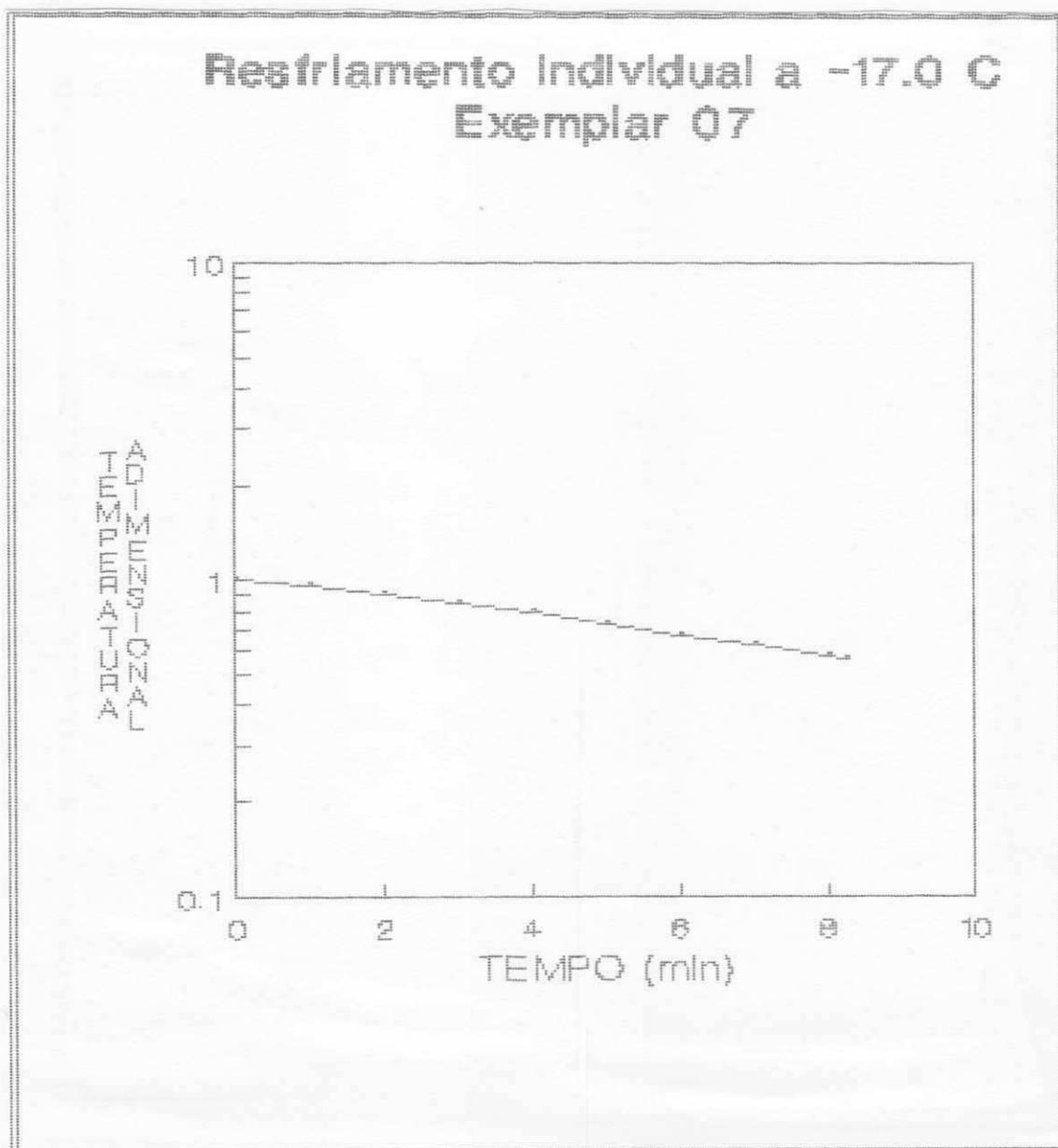


FIGURA 14C

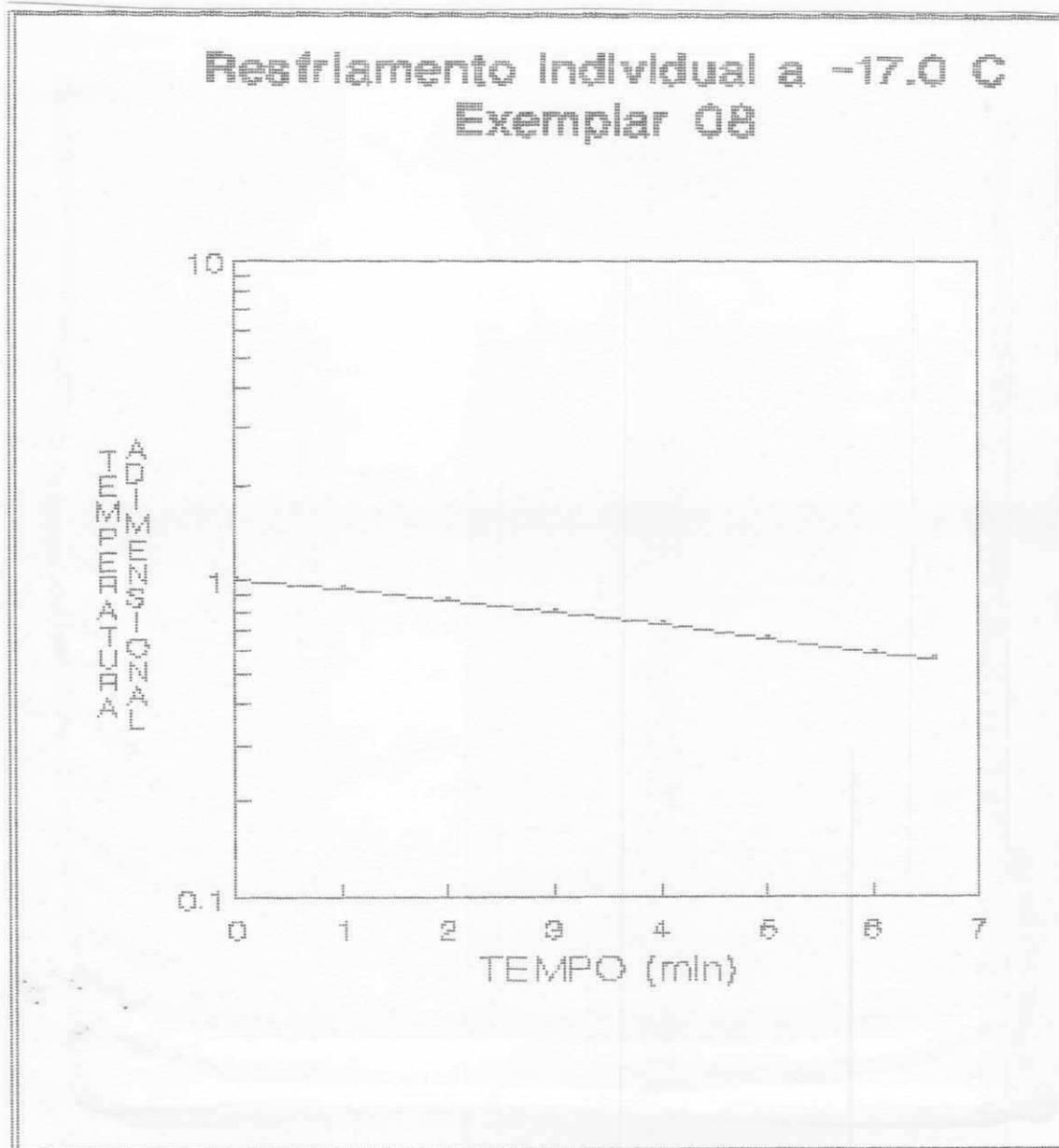
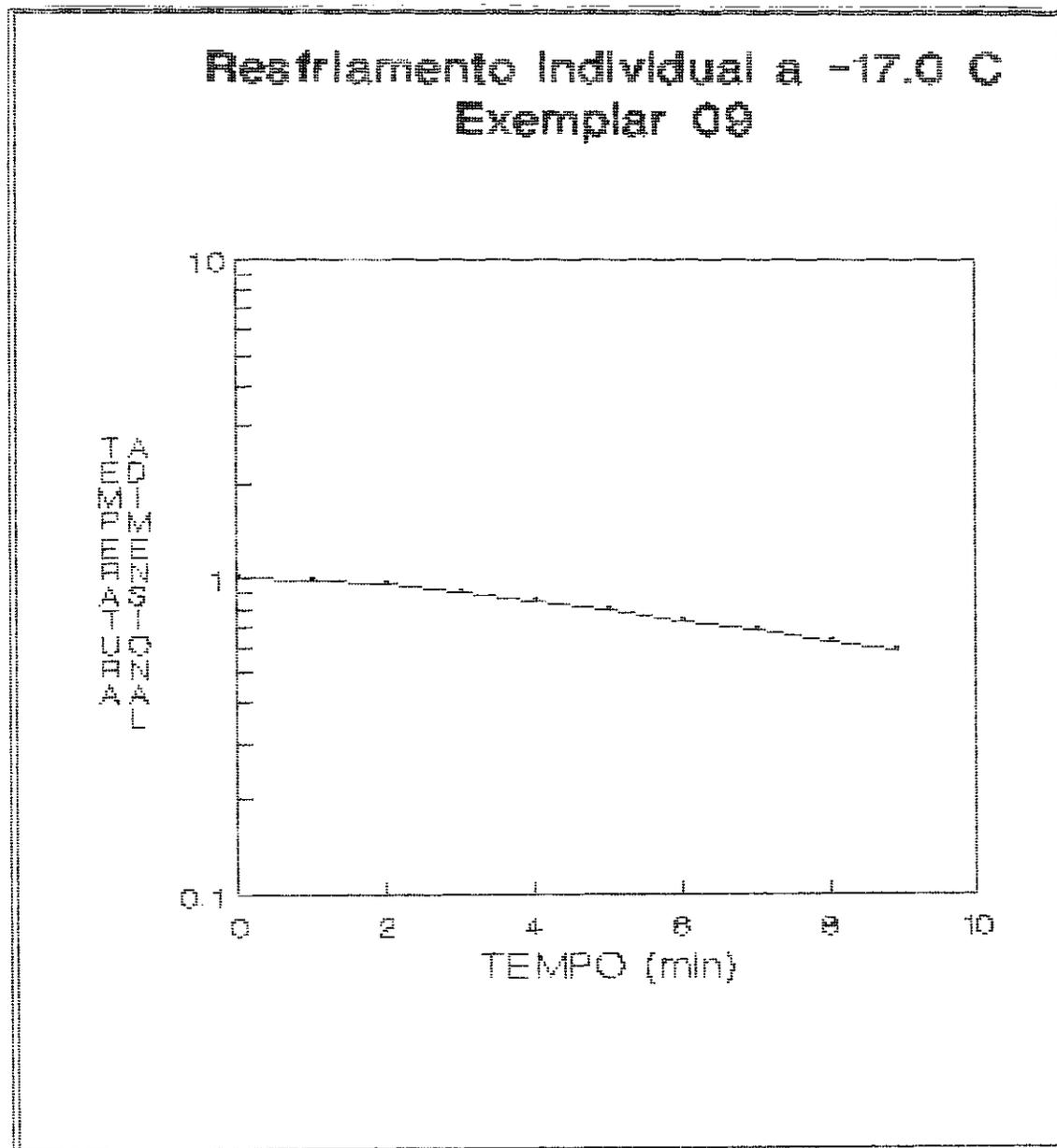


FIGURA 15C



F I G U R A 16C

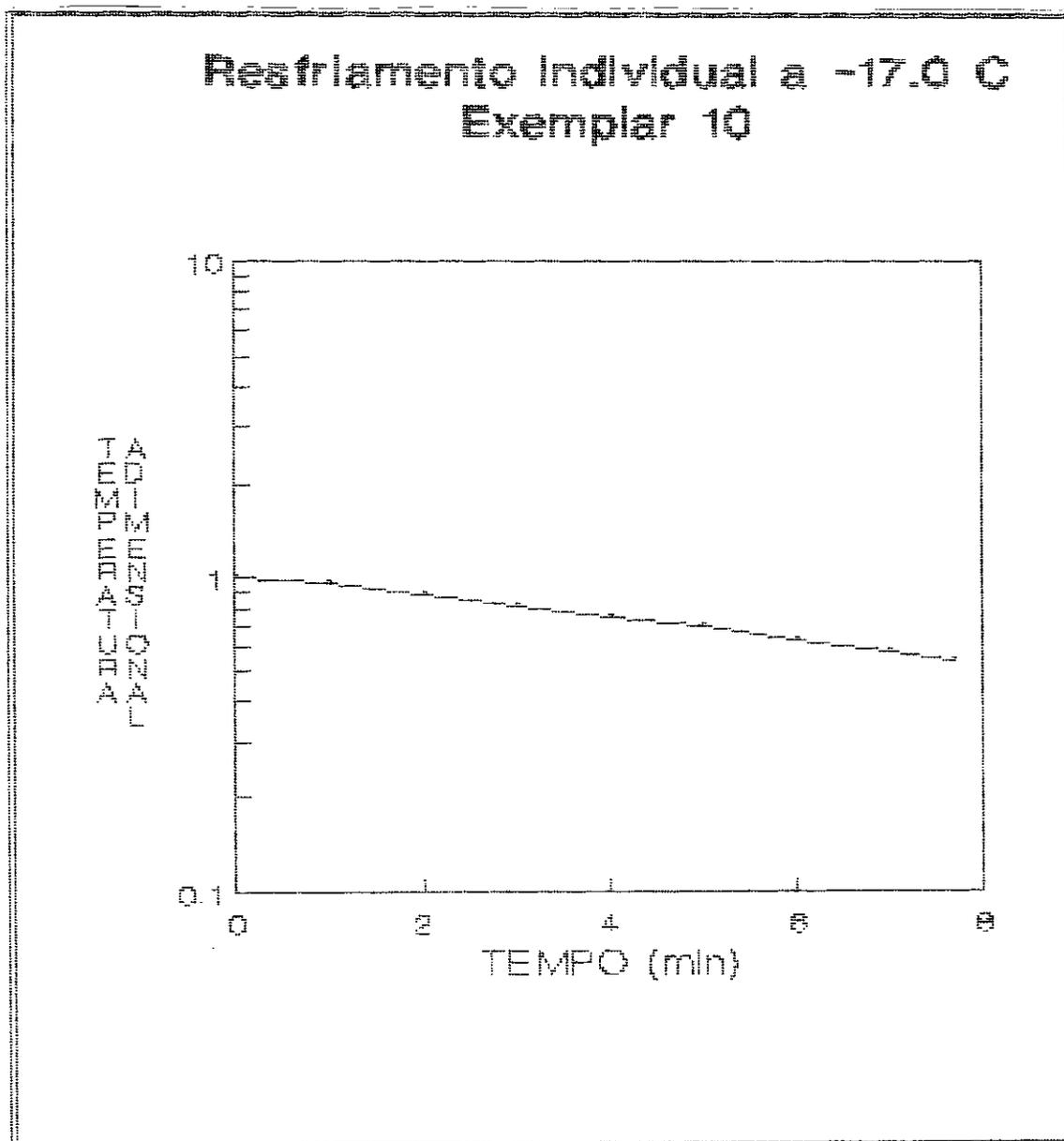
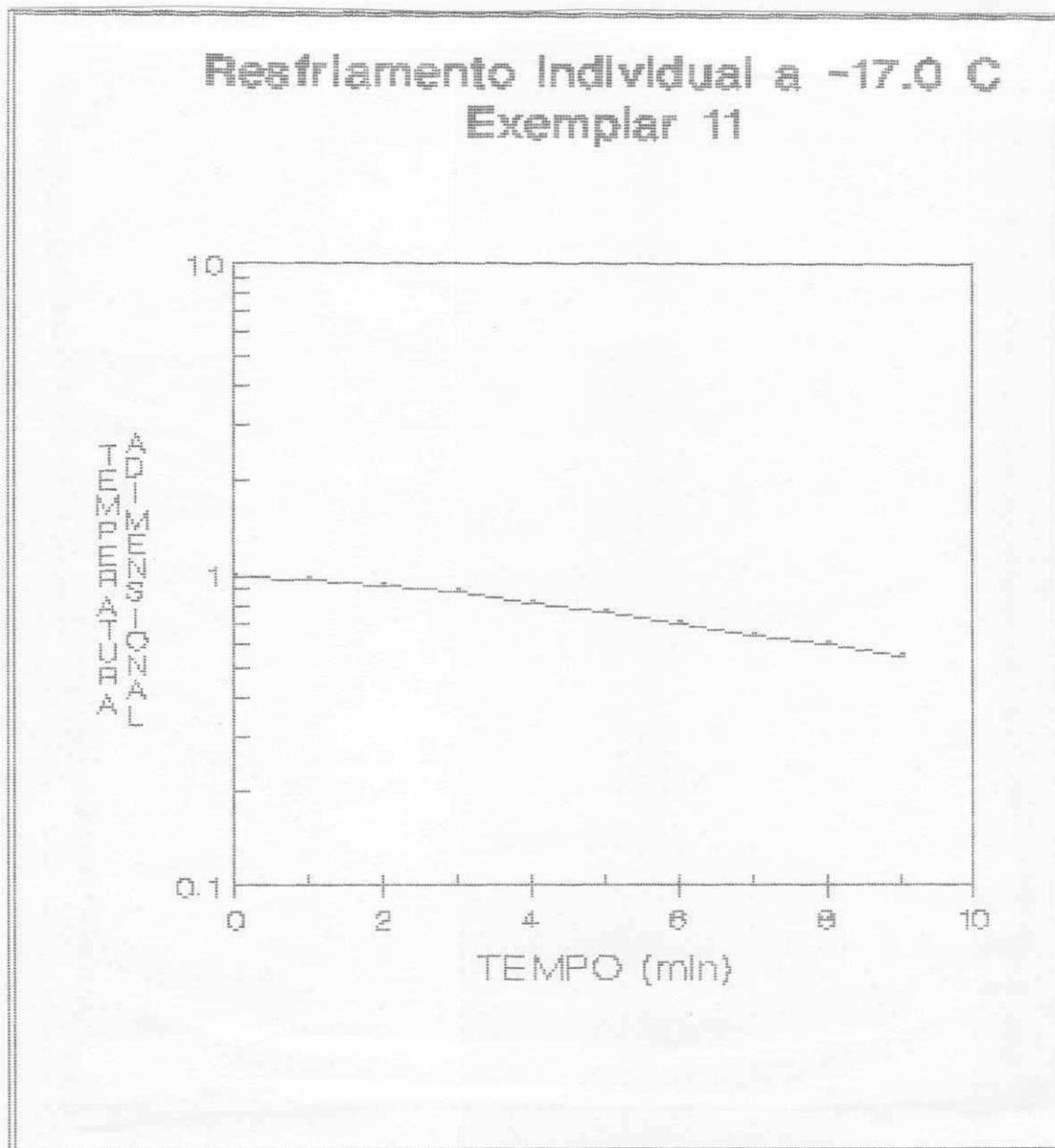
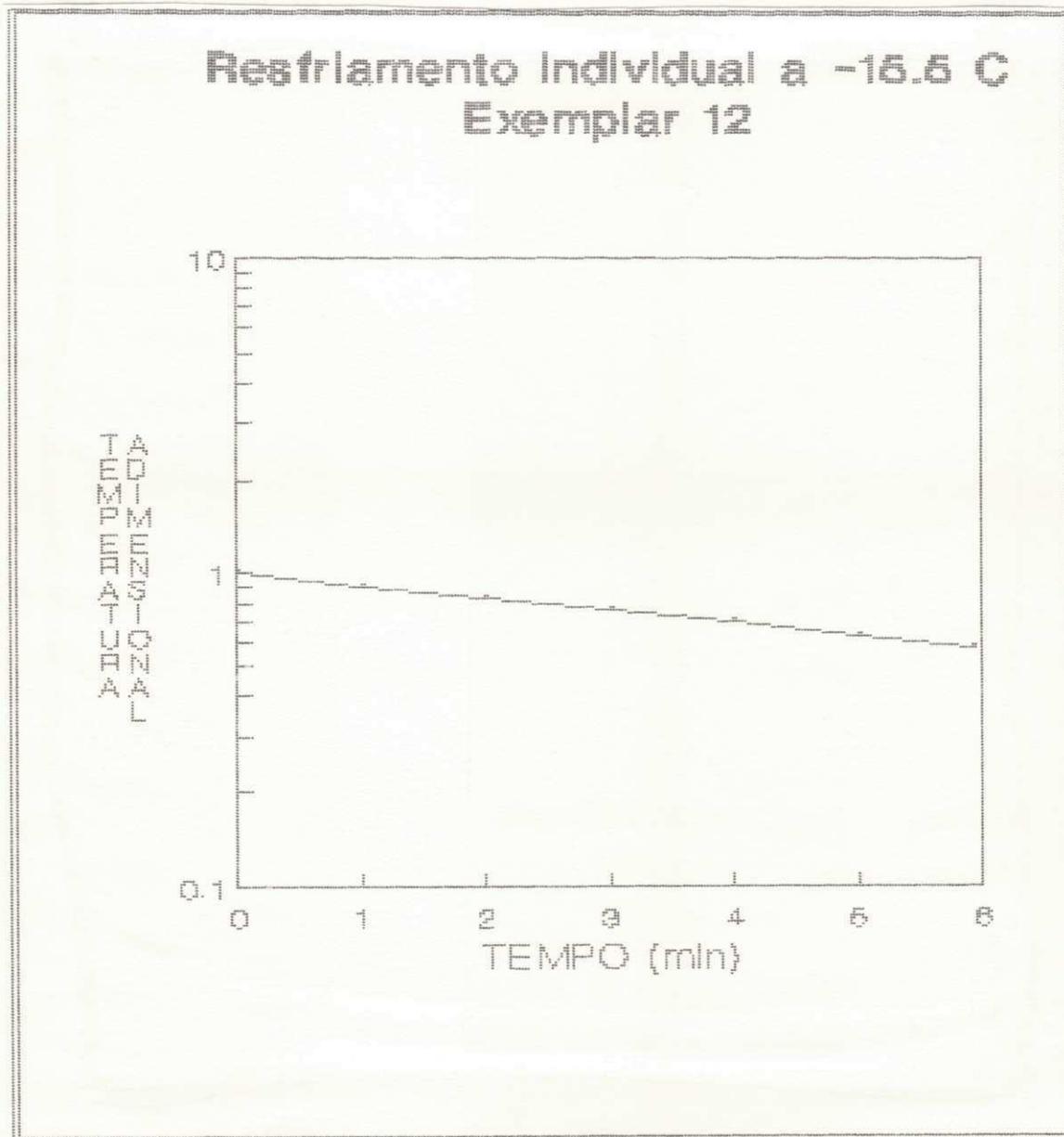


FIGURA 17C



F I G U R A 18C



F I G U R A 190

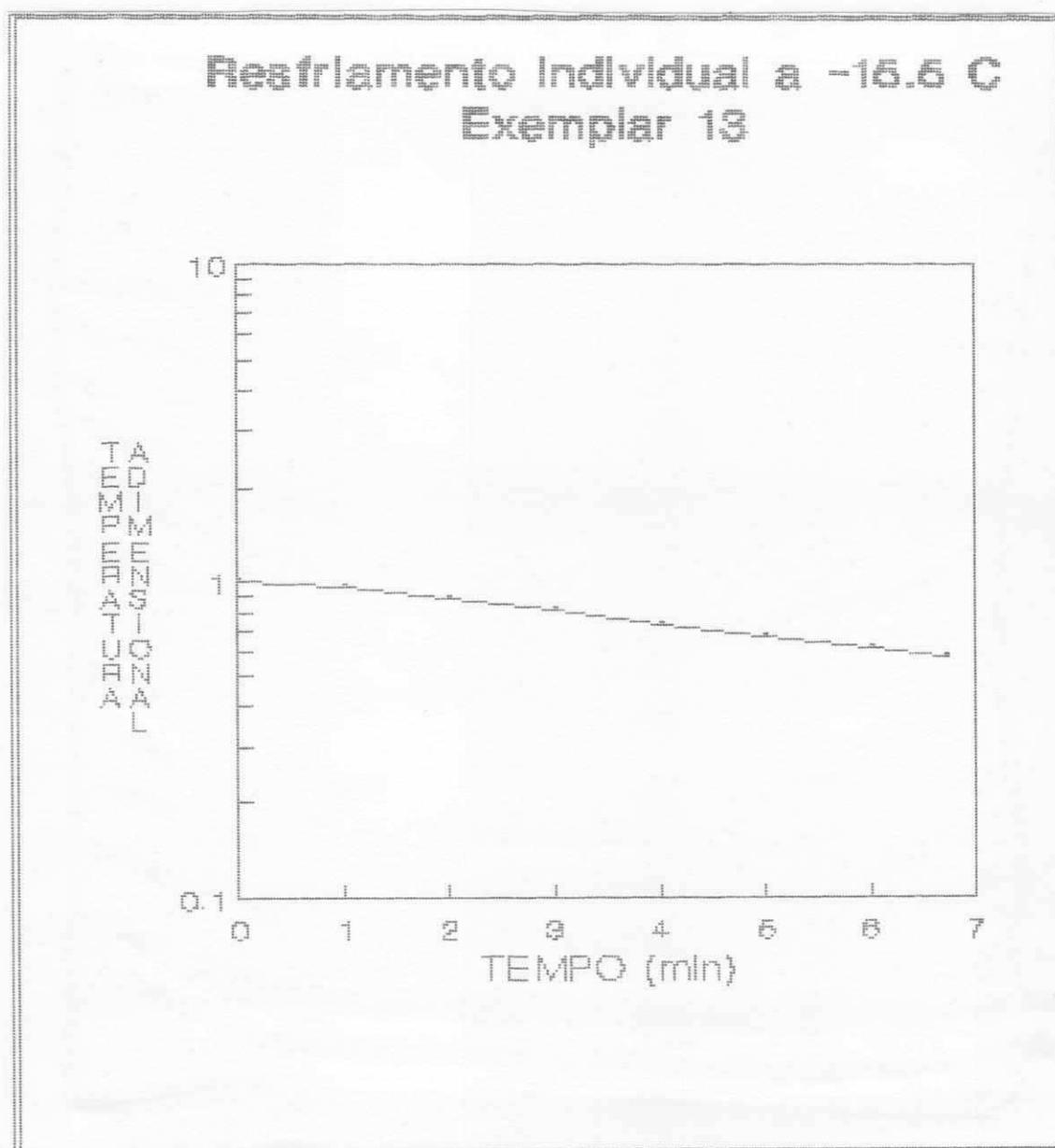


FIGURA 20C

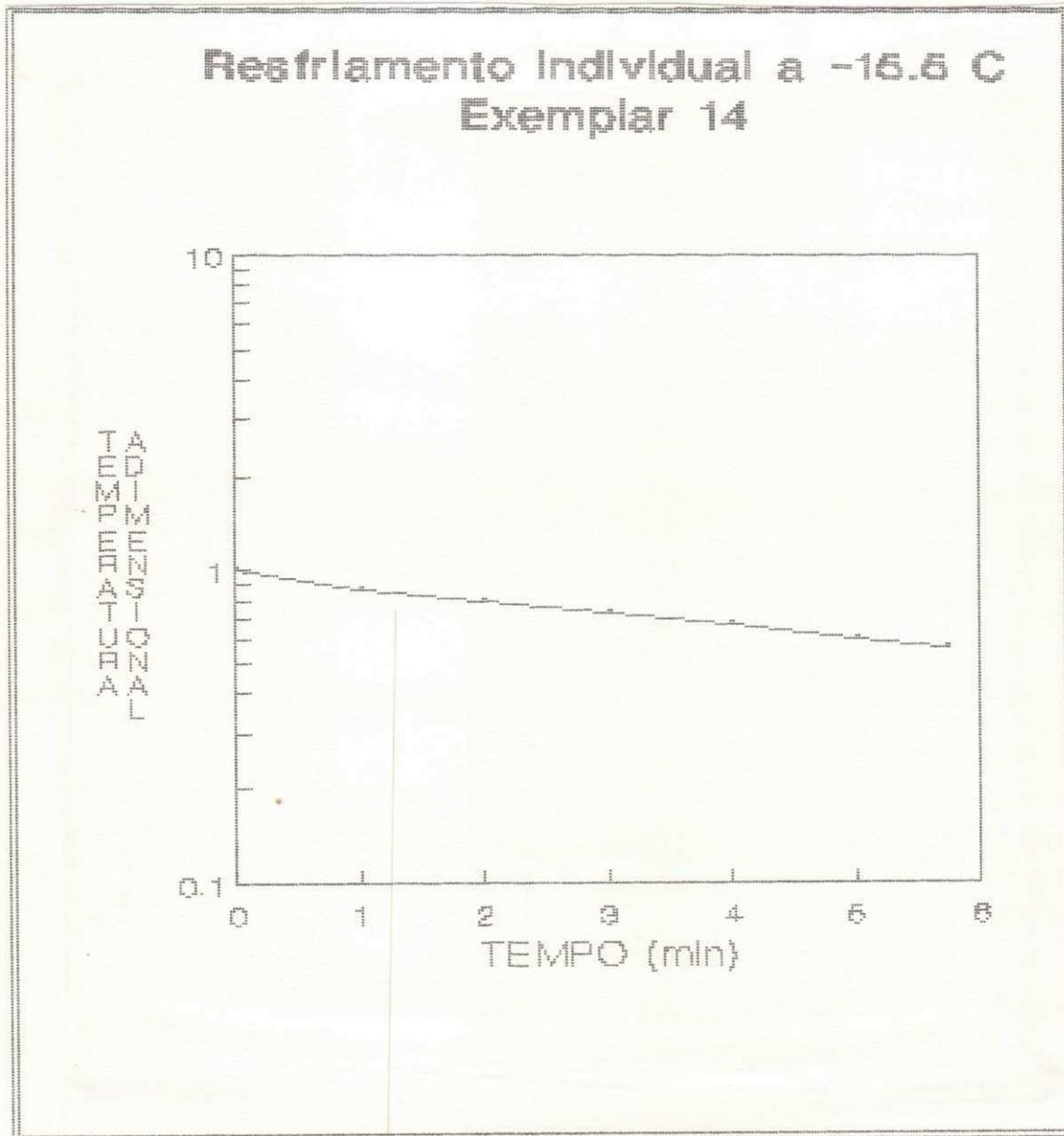


FIGURA 21C

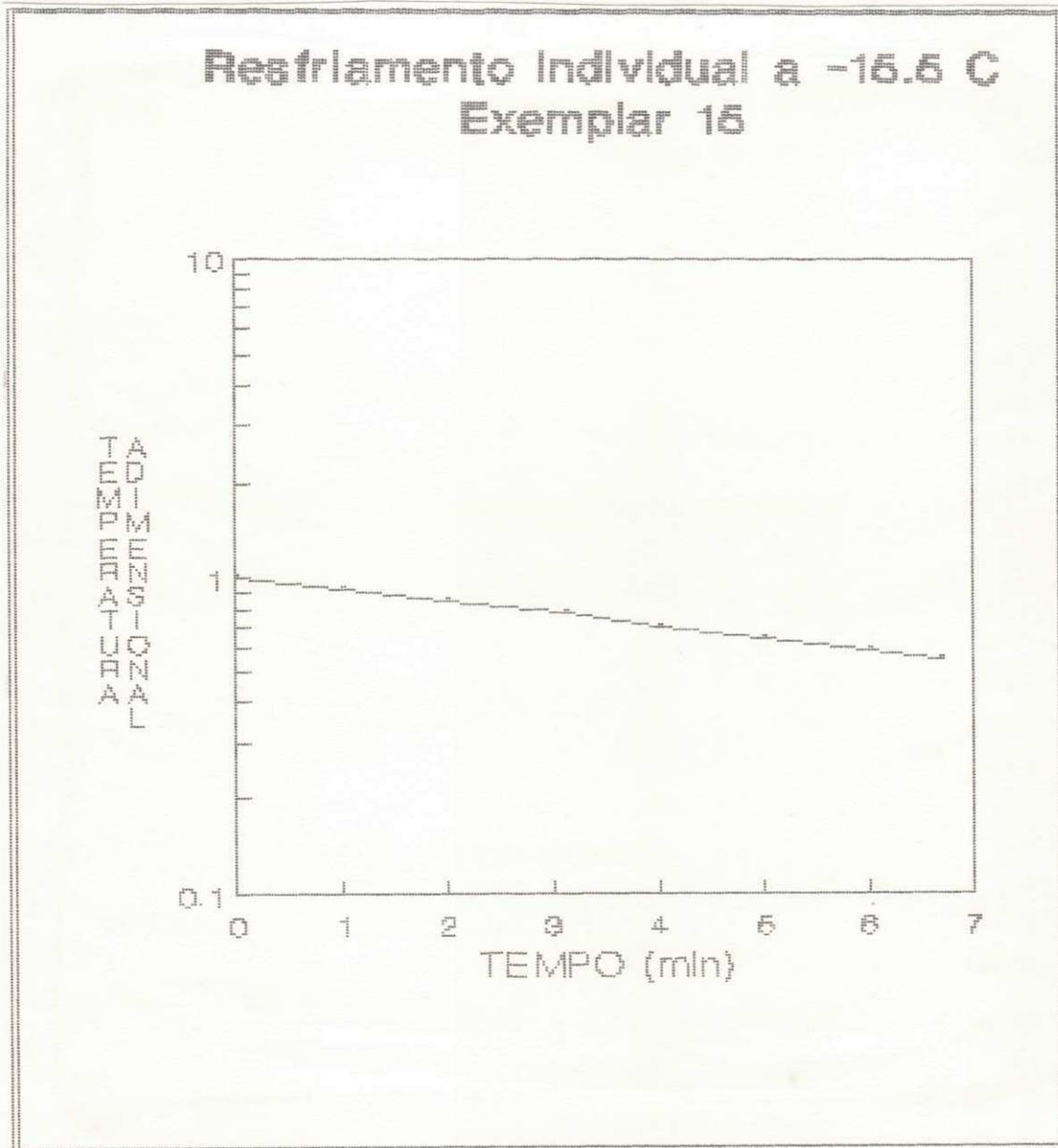


FIGURA 22C

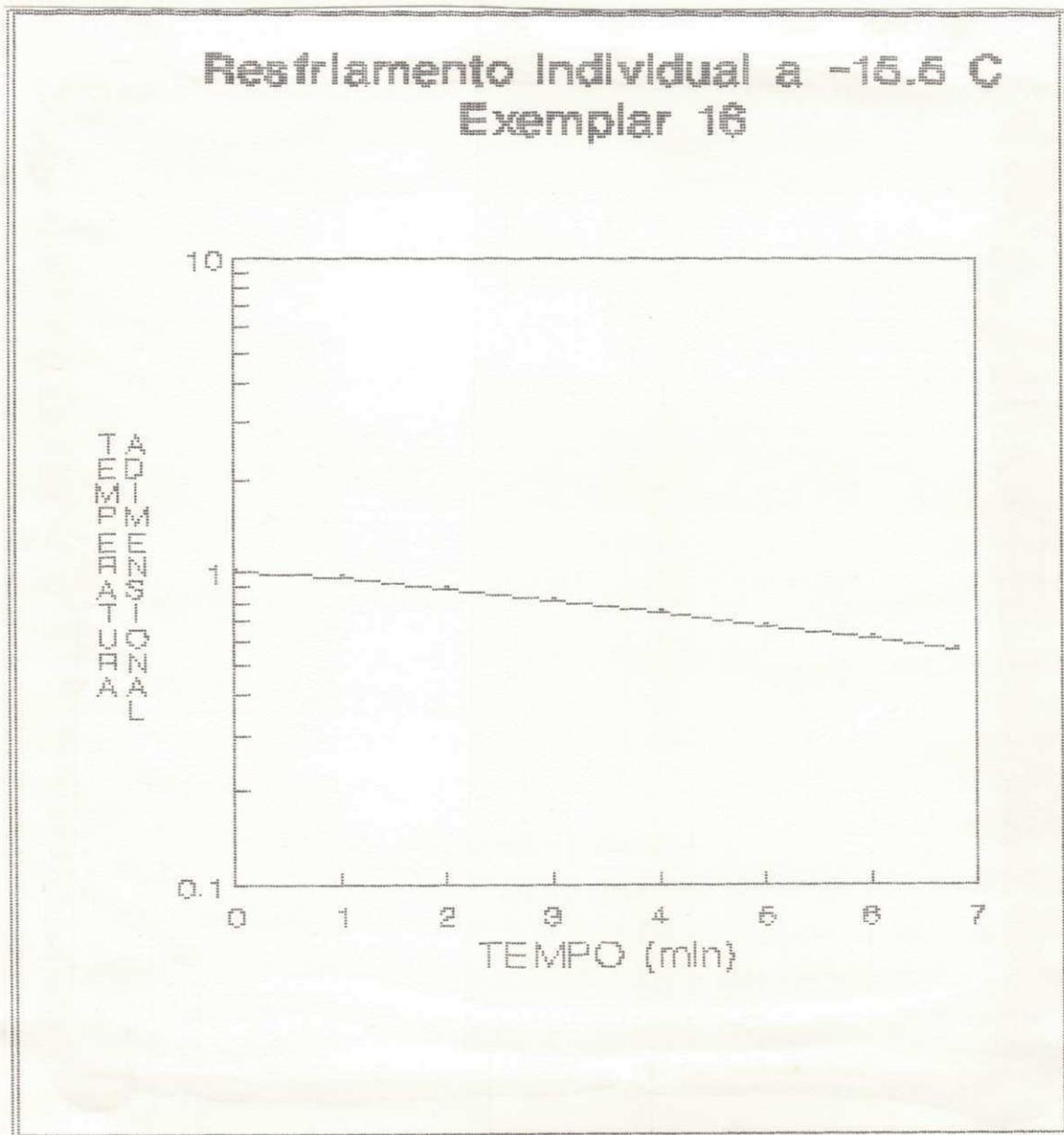


FIGURA 23C

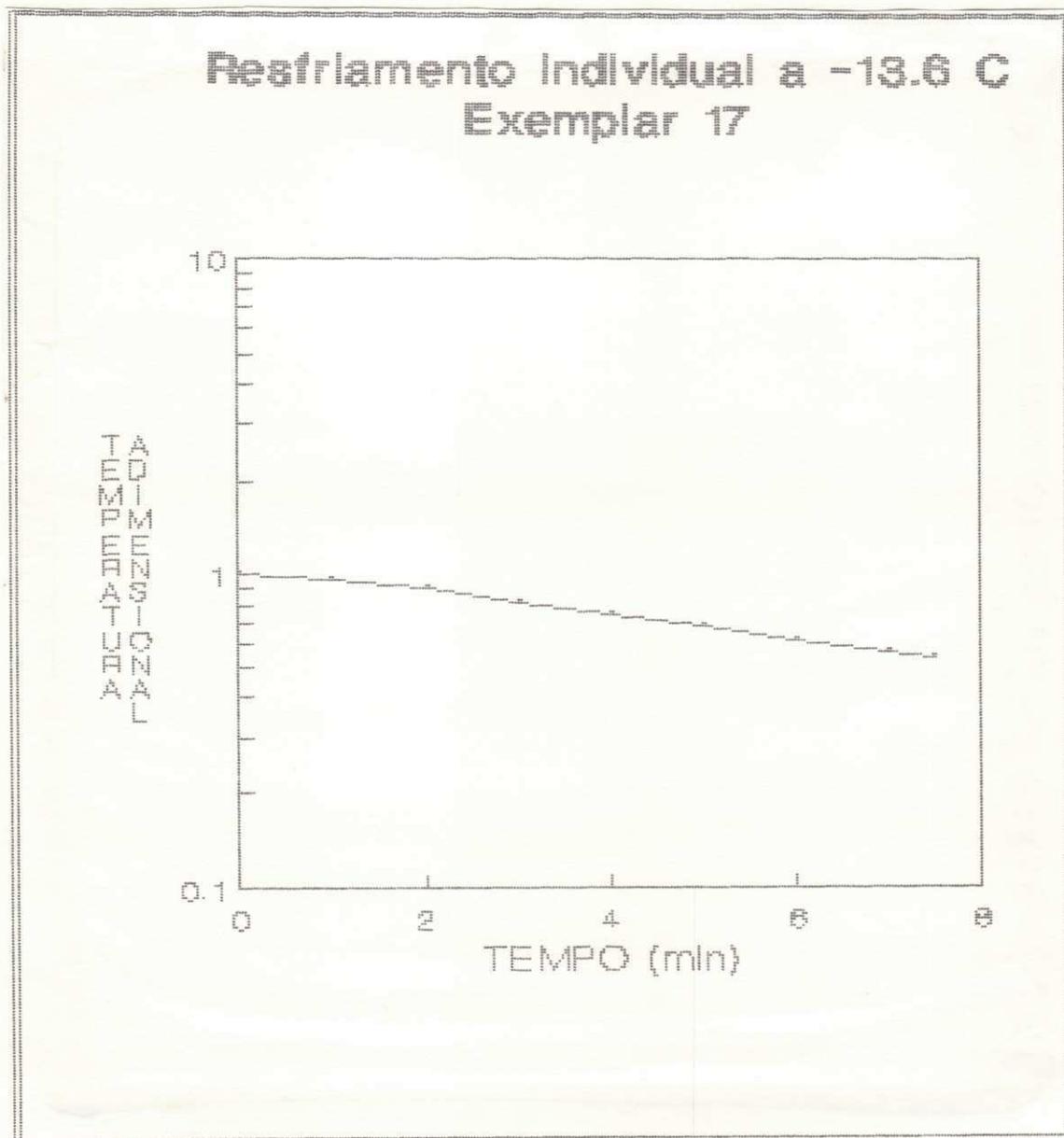


FIGURA 24C

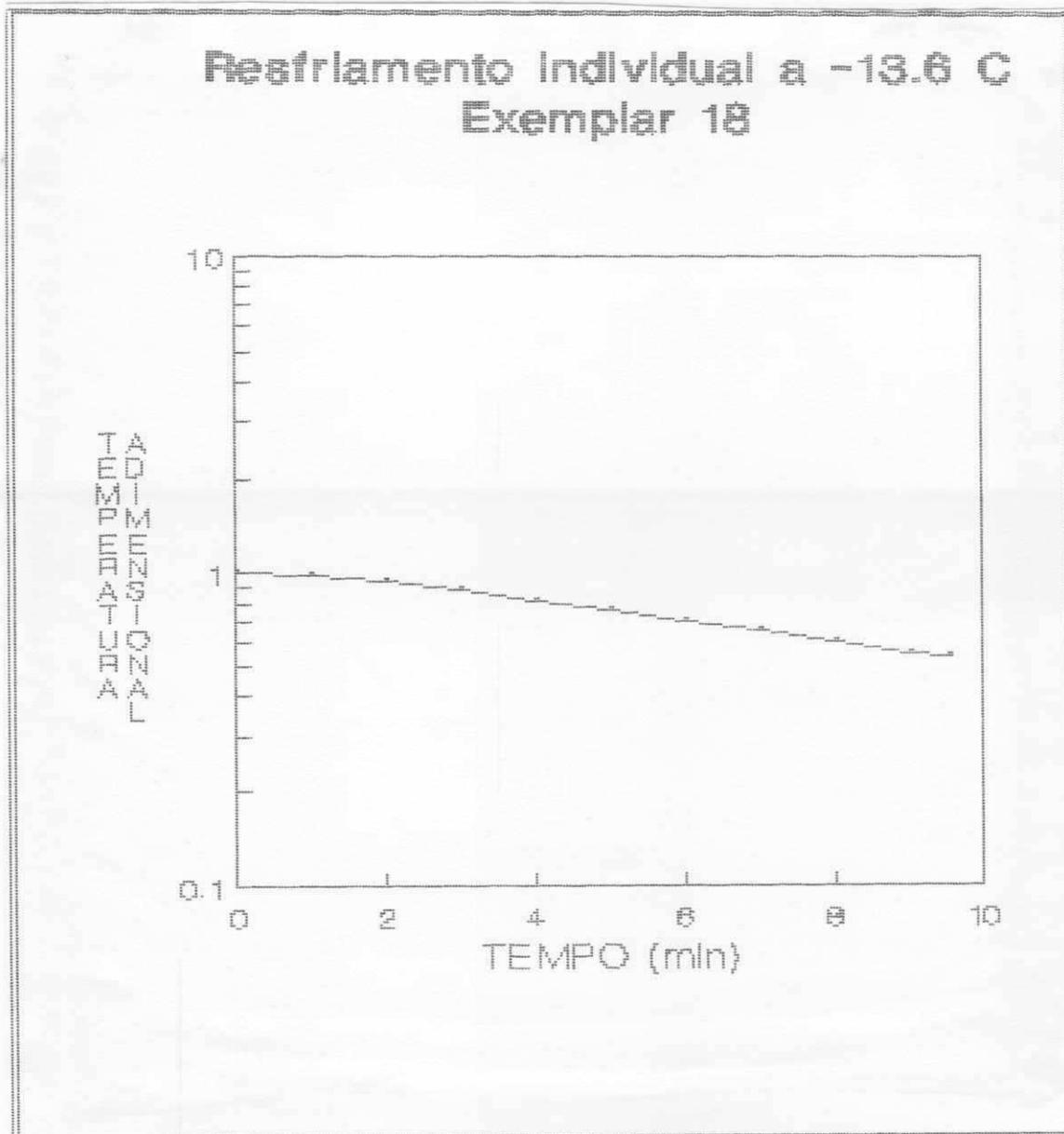
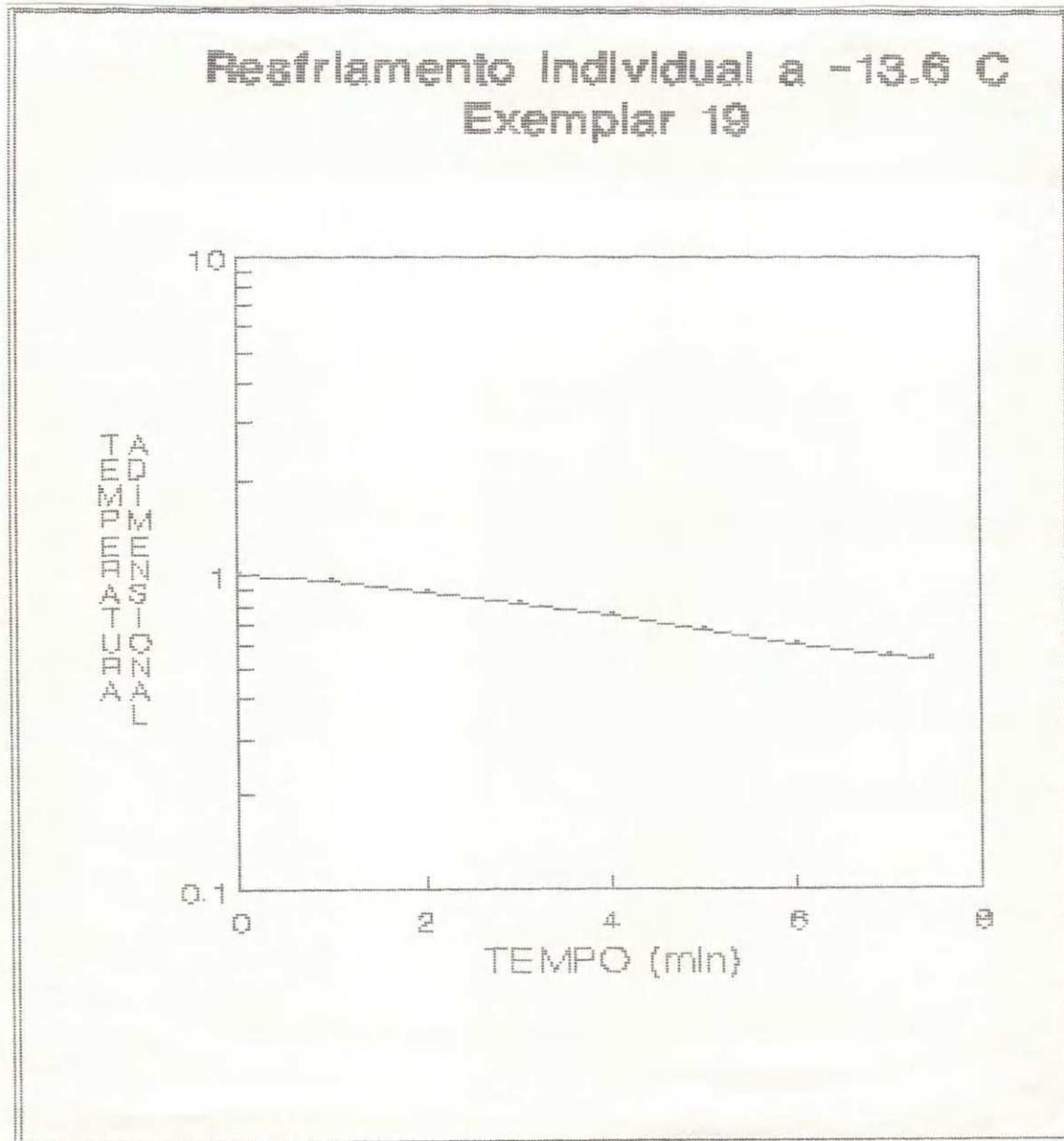


FIGURA 25C



F I G U R A 26C

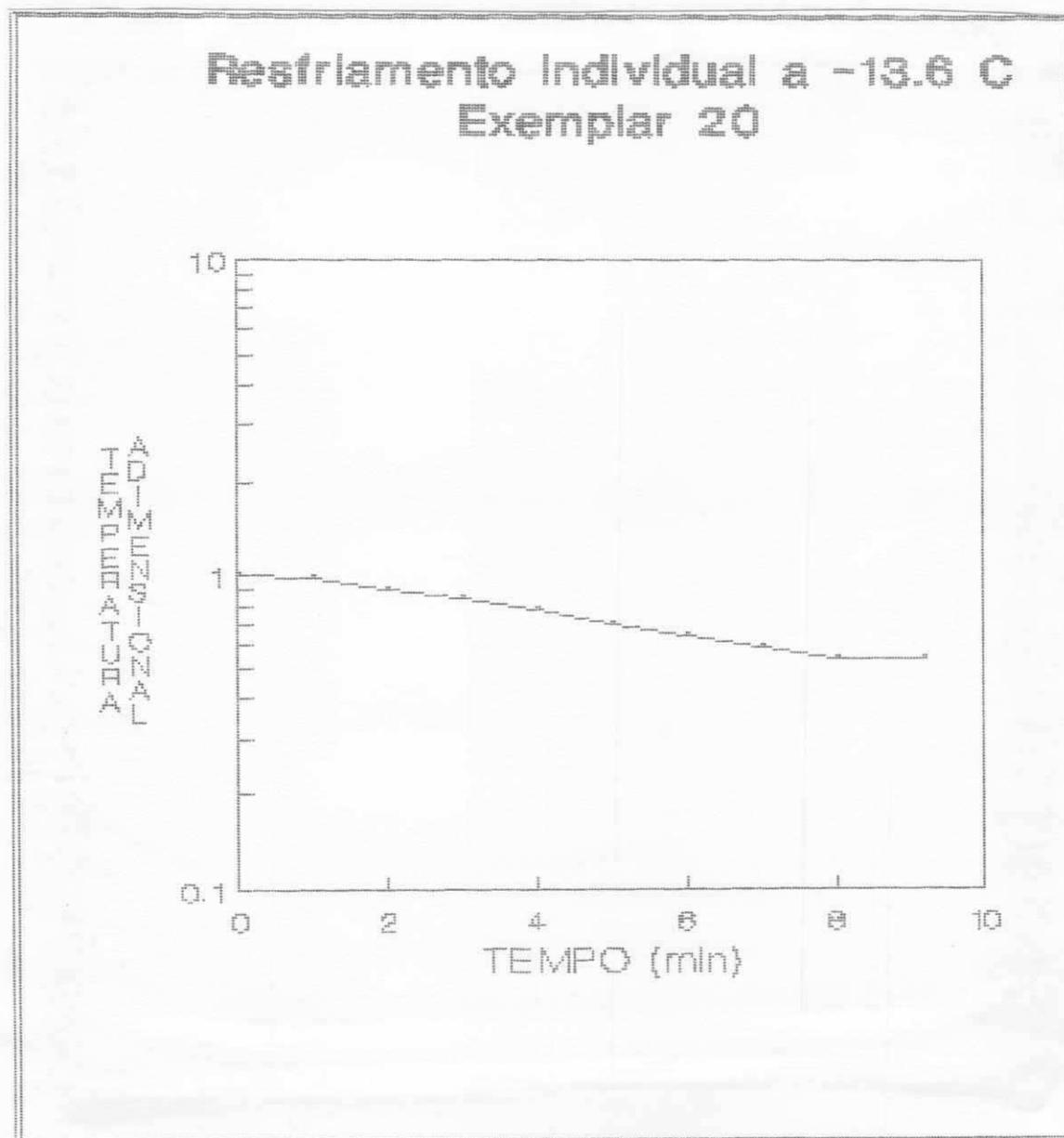


FIGURA 27C

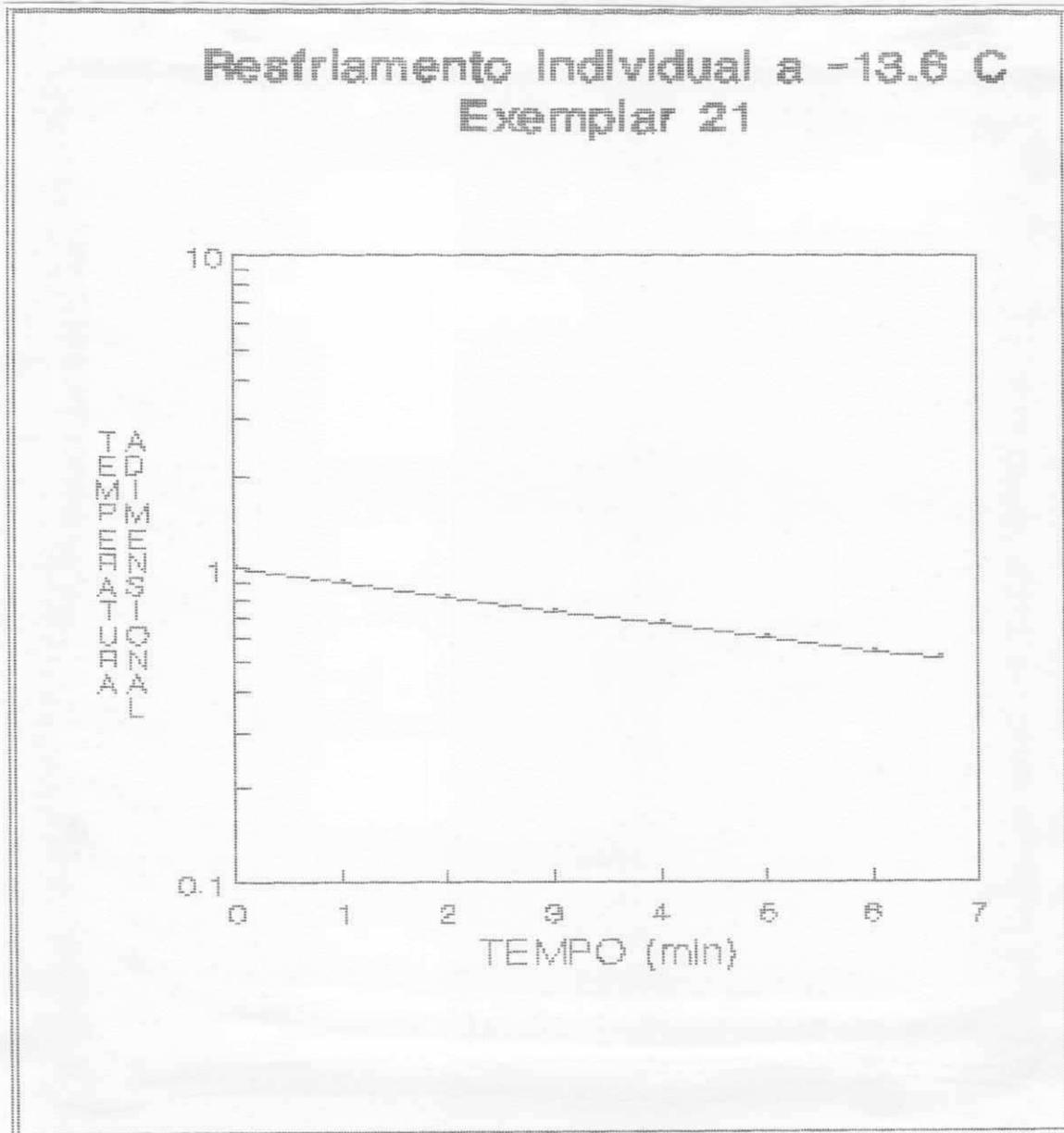


FIGURA 28C

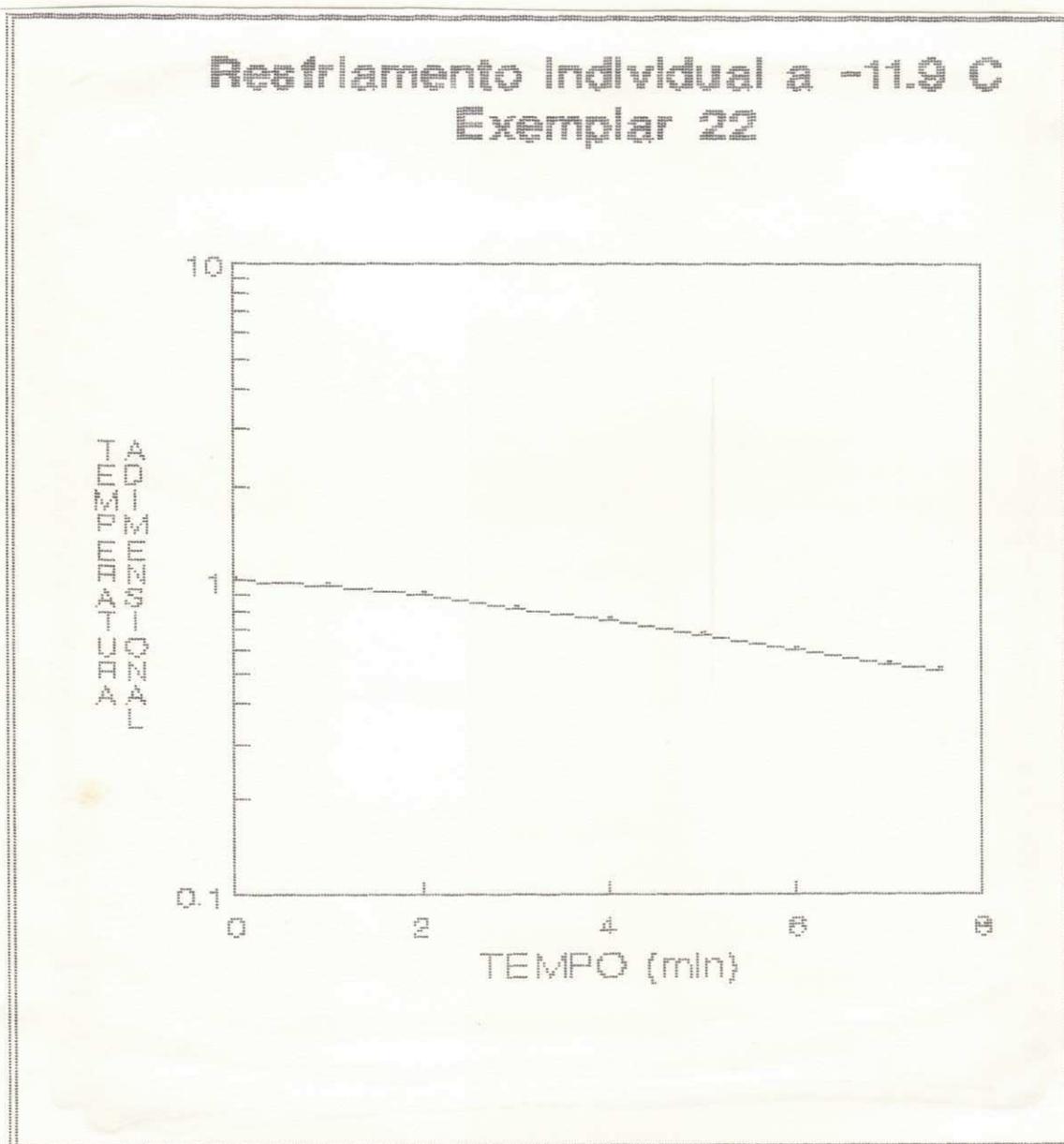
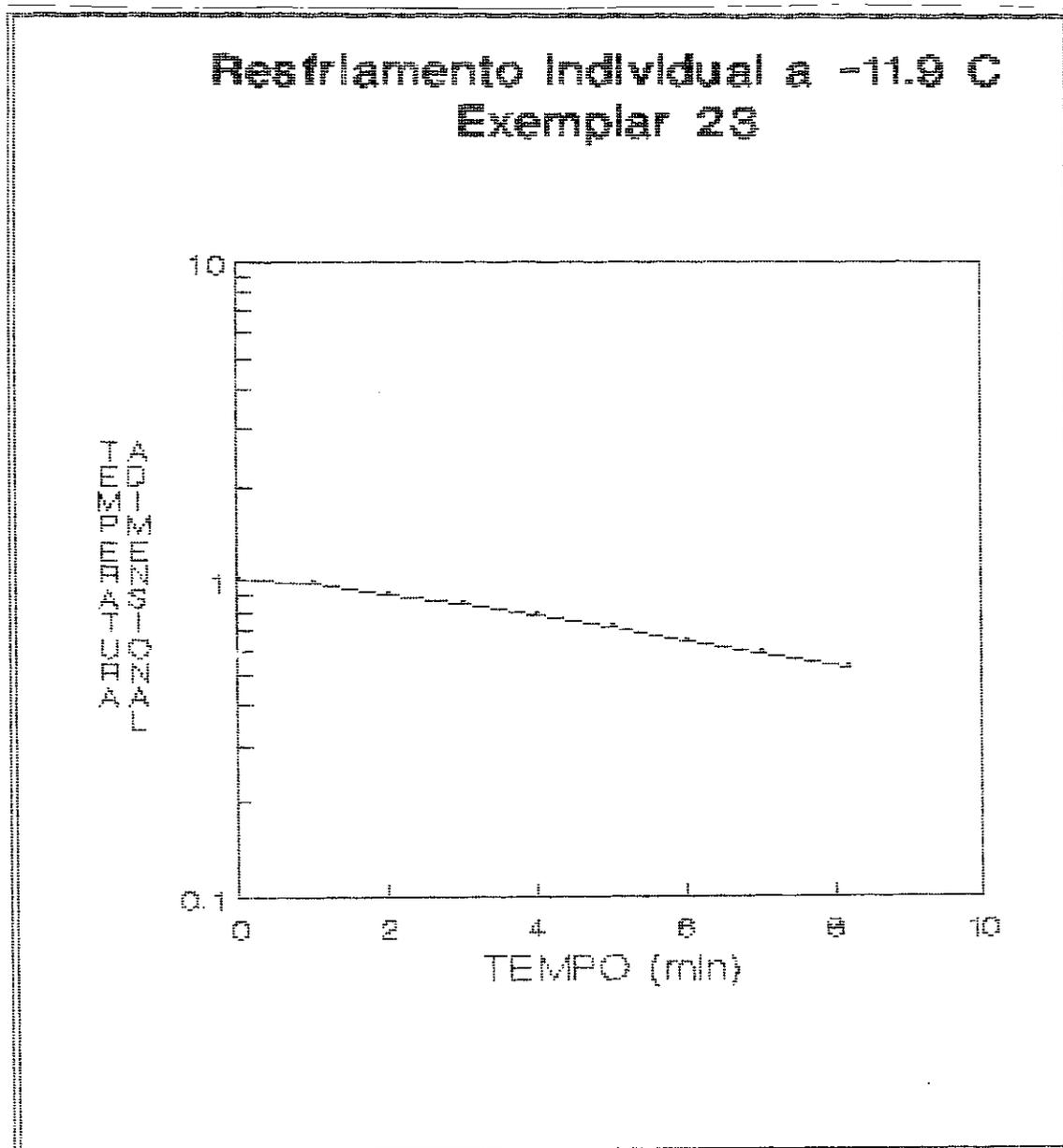
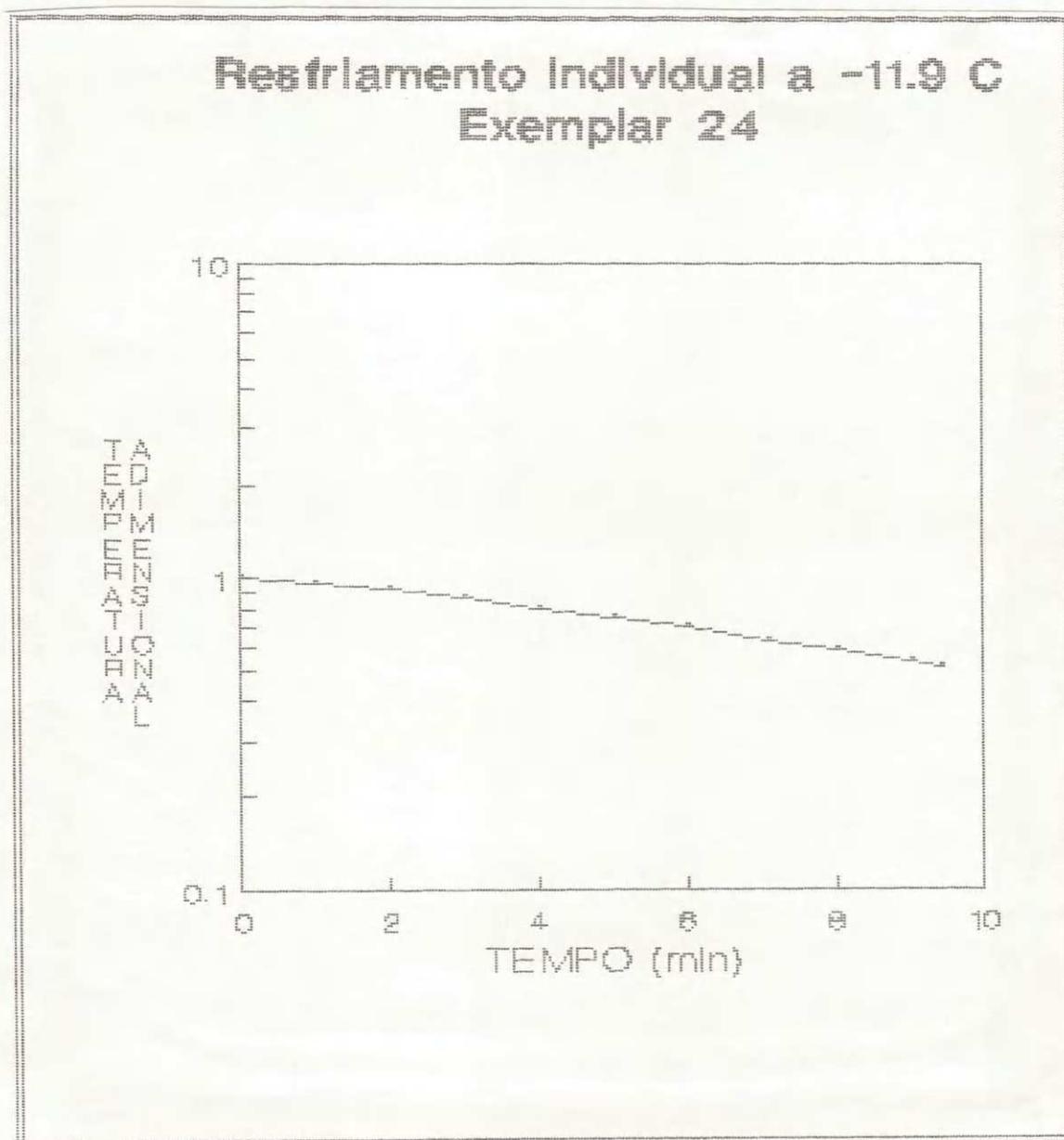


FIGURA 29C



F I G U R A 30C



F I G U R A 31C

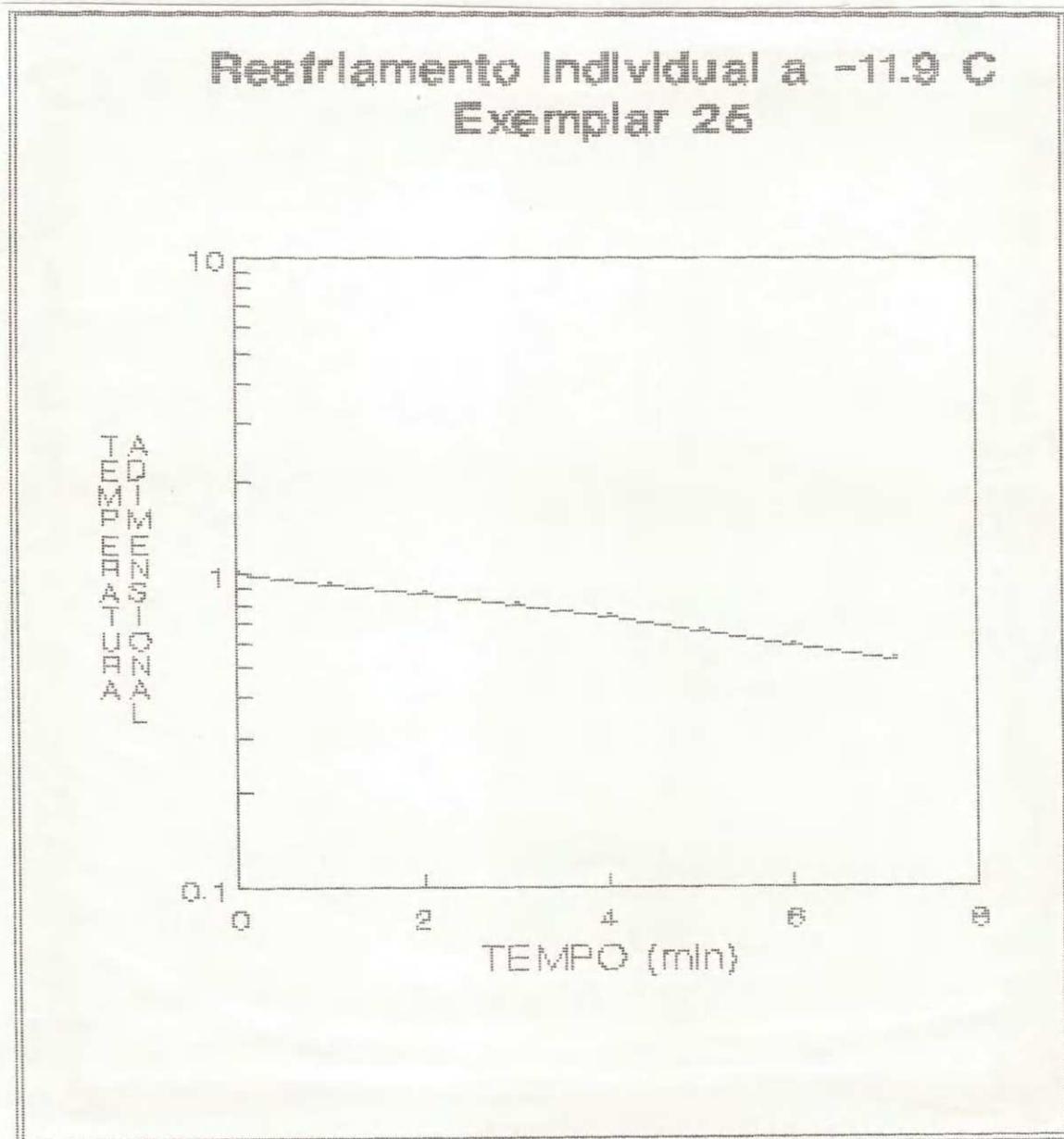


FIGURA 32C

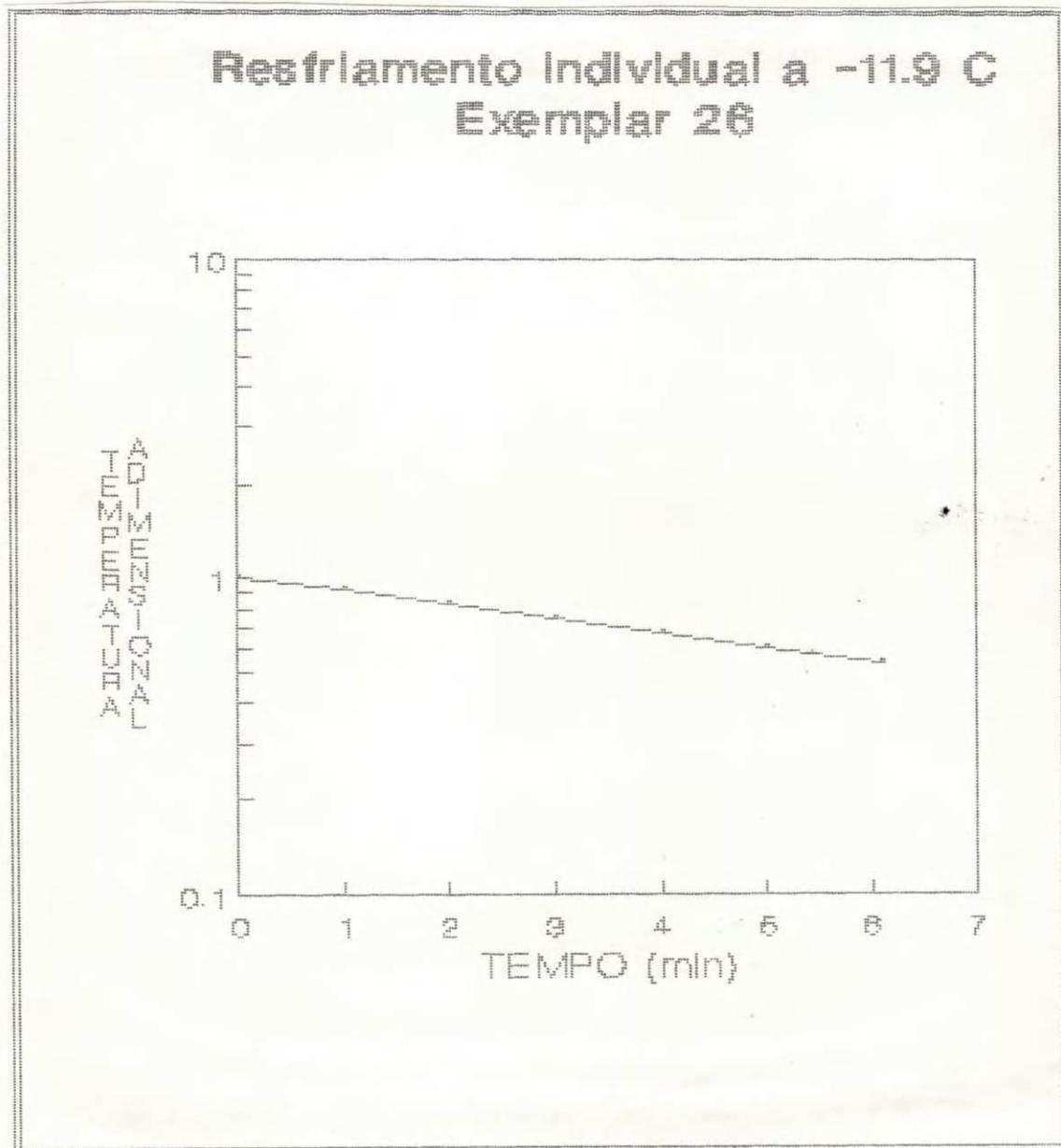


FIGURA 33C

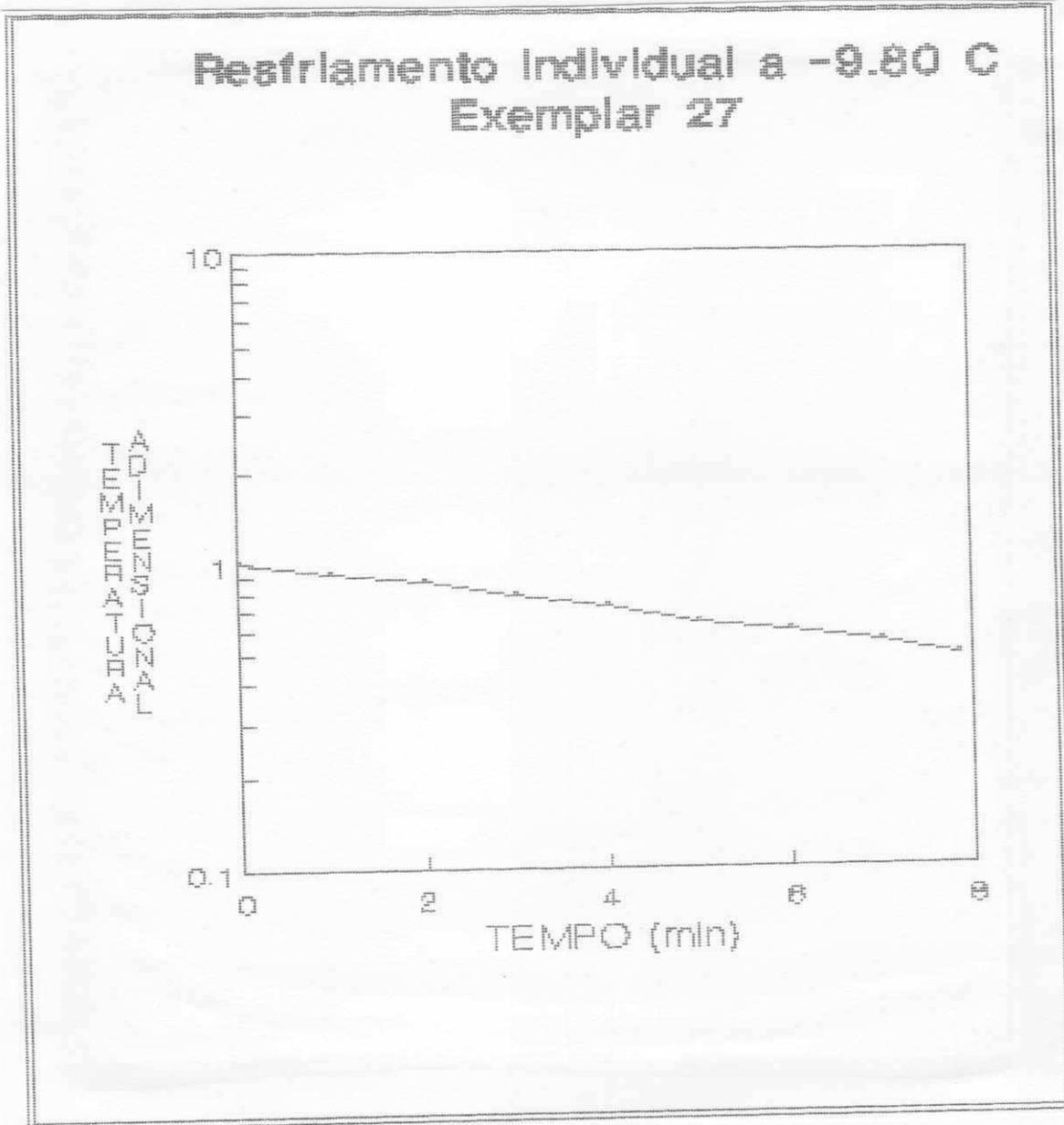
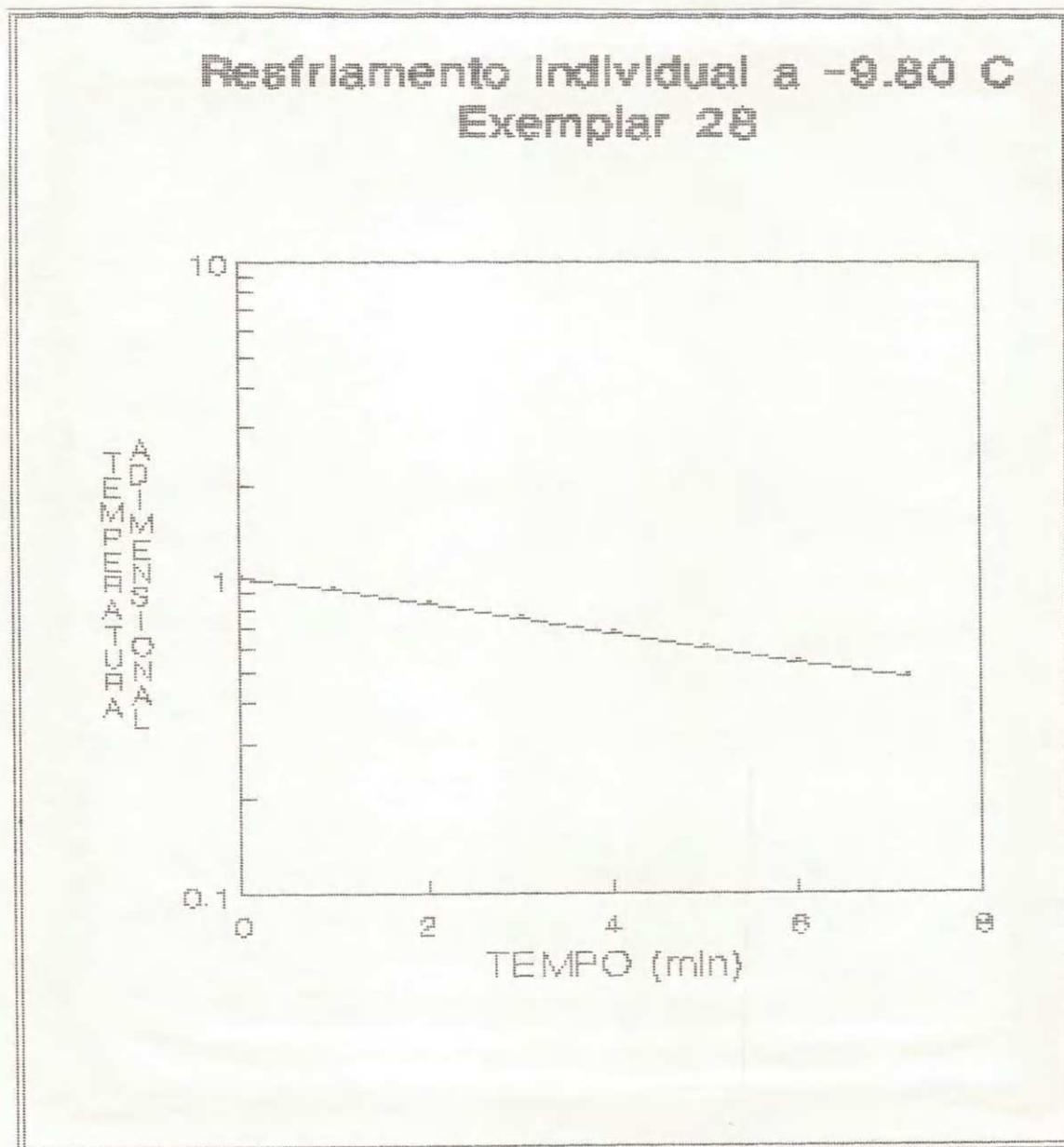


FIGURA 34C



F I G U R A 350

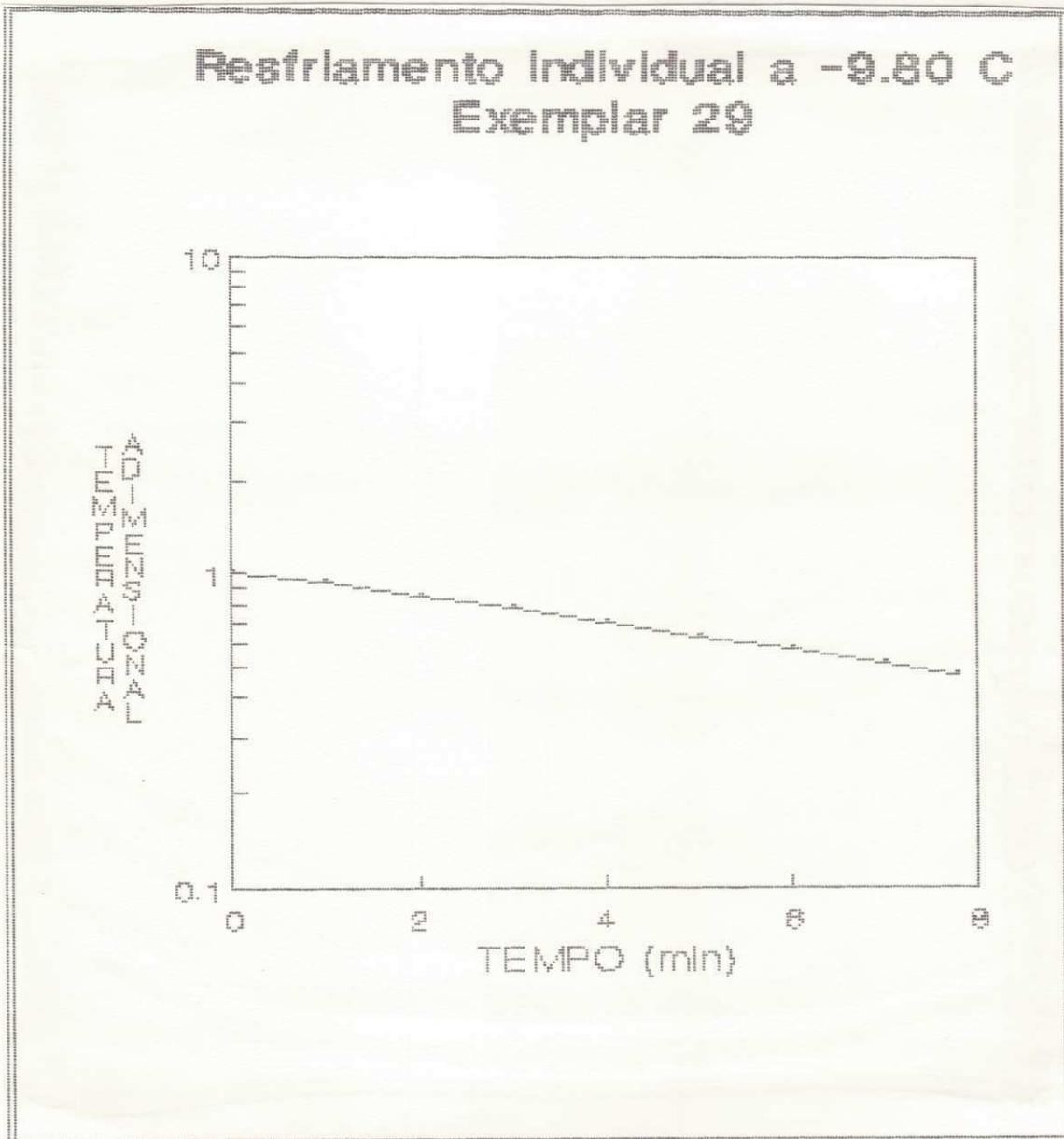
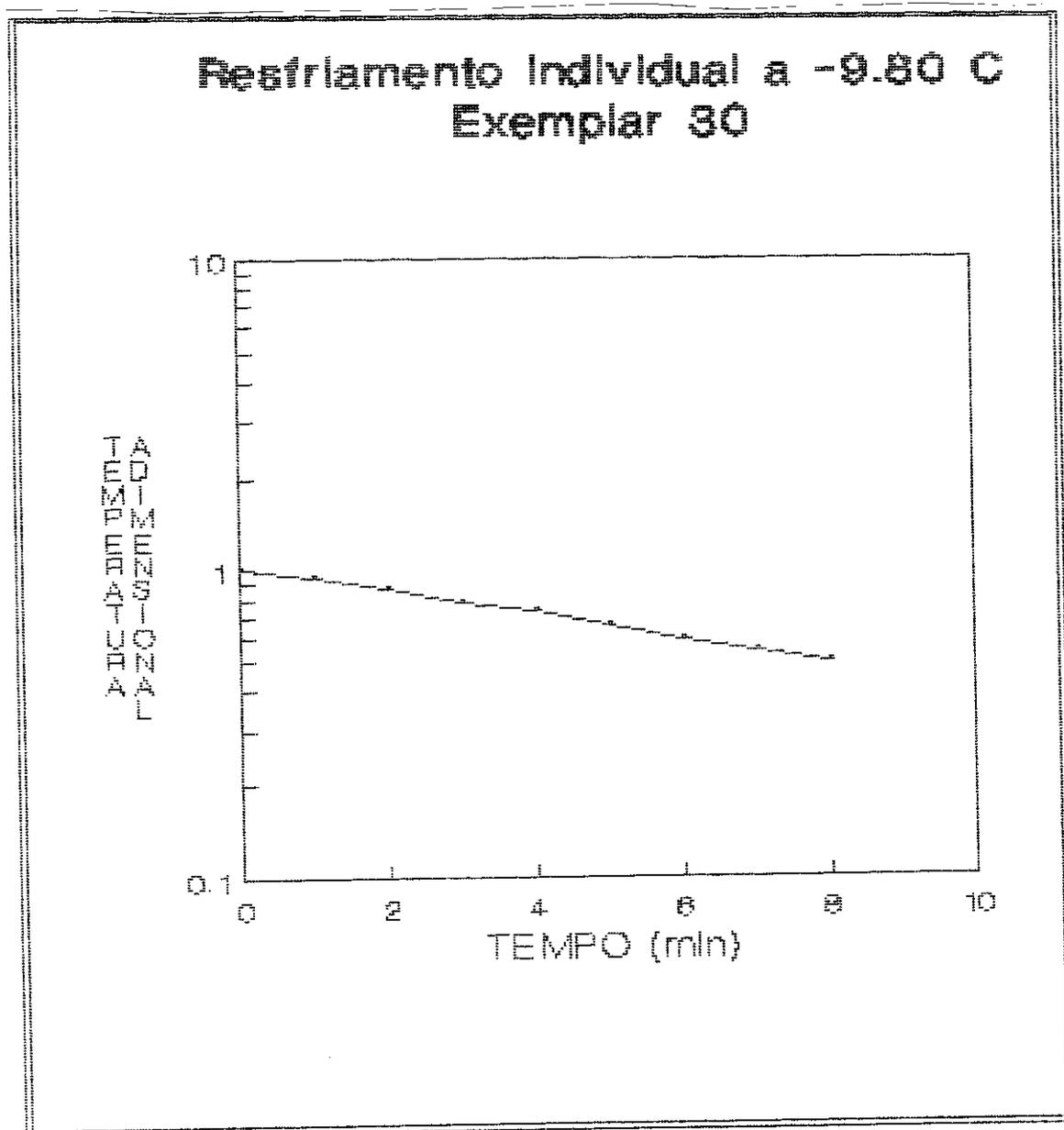
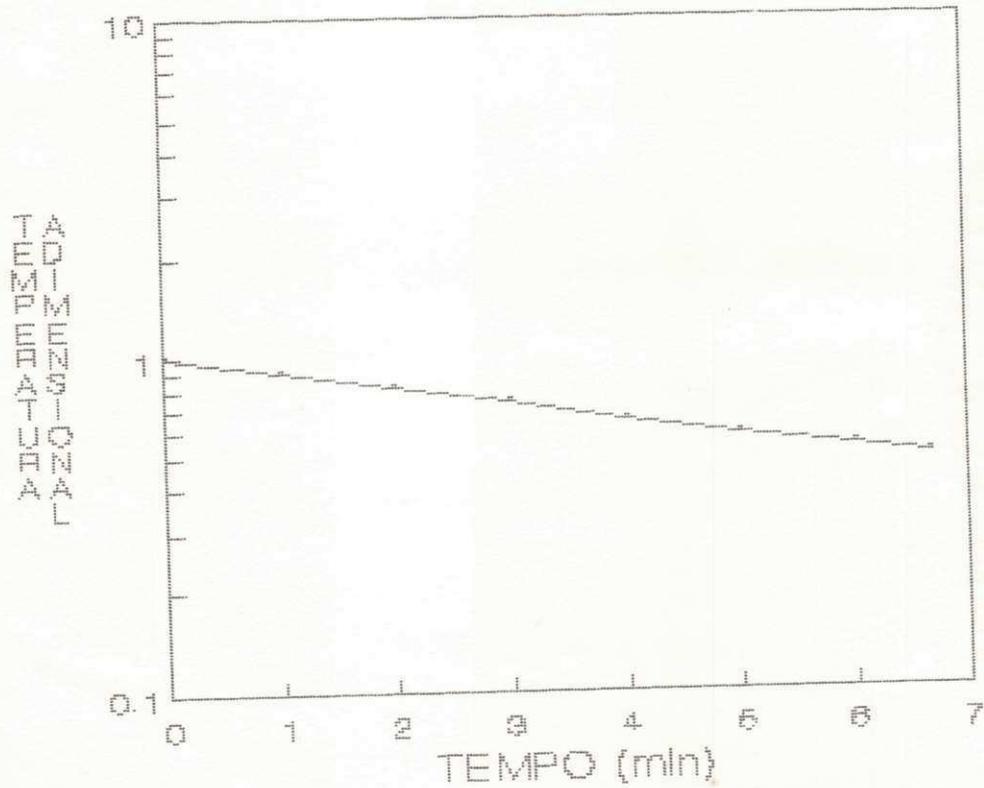


FIGURA 36C



Resfriamento Individual a -9.80 C Exemplar 31



APENDICE D

TABELAS 1D a 4D: Dados médios de Tempo X Temperatura para resfriamentos sob as temperaturas $-20,3^{\circ}\text{C}$; -17°C ; $15,5^{\circ}\text{C}$ e $-13,6^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

TABELA 1D

Média dos exemplares (01 a 05)	
t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,94
2,00	0,88
3,00	0,82
4,00	0,75
5,20	0,68
6,00	0,63

TABELA 2D

Média dos exemplares (06 a 11)	
t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,97
2,00	0,92
3,00	0,85
4,00	0,79
5,00	0,73
6,00	0,67
7,90	0,67

TABELA 3D

Média dos exemplares (12 a 16)	
t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,92
2,00	0,85
3,00	0,77
4,00	0,70
5,00	0,64
5,90	0,59

TABELA 4D

Média dos exemplares (17 a 21)	
t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,96
2,00	0,89
3,00	0,82
4,00	0,74
5,00	0,68
6,00	0,62
6,90	0,57

TABELAS 5D e 6D: Dados médios de Tempo X Temperatura para resfriamentos sob as temperaturas $-11,9^{\circ}\text{C}$ e $-9,8^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

TABELA 5D

Média dos exemplares
(22 a 26)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,95
2,00	0,88
3,00	0,81
4,00	0,74
5,00	0,67
6,00	0,60

TABELA 6D

Média dos exemplares
(27 a 31)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,93
2,00	0,84
3,00	0,76
4,00	0,69
5,00	0,62
6,00	0,56
7,00	0,51

TABELAS 7D a 8D: Dados de Tempo X Temperatura para o resfriamento individual dos exemplares 01 a 04.

TABELA 7D

EXEMPLAR 01
(TR = -20,3°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,94
2,00	0,85
3,00	0,77
4,00	0,69
5,25	0,60

TABELA 8D

EXEMPLAR 02
(TR = -20,3°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,99
2,00	0,95
3,00	0,91
4,00	0,85
5,00	0,80
6,00	0,75
7,00	0,70
8,00	0,65
9,00	0,60
9,28	0,59

TABELA 09

EXEMPLAR 03
(TR = -20,3°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,97
2,00	0,91
3,00	0,86
4,00	0,80
5,00	0,68
6,00	0,63
7,73	0,60

TABELA 10

EXEMPLAR 04
(TR = -20,3°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,90
2,00	0,83
3,00	0,76
4,00	0,69
5,00	0,63
5,67	0,59

TR = Temperatura de resfriamento

TABELAS 110 a 140: Dados de Tempo X Temperatura para o resfriamento individual dos exemplares 05 a 08.

TABELA 110

EXEMPLAR 05
(TR = -20,3°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,93
2,00	0,86
3,00	0,78
4,00	0,71
5,00	0,64
6,00	0,58
6,42	0,56

TABELA 120

EXEMPLAR 06
(TR = -17,0°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,96
2,00	0,90
3,00	0,83
4,00	0,77
5,00	0,70
6,00	0,65
7,00	0,59
7,75	0,56

TABELA 130

EXEMPLAR 07
(TR = -17,0°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,96
2,00	0,91
3,00	0,85
4,00	0,79
5,00	0,73
6,00	0,67
7,00	0,62
8,00	0,57
8,27	0,56

TABELA 140

EXEMPLAR 08
(TR = -17,0°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,95
2,00	0,87
3,00	0,79
4,00	0,72
5,00	0,65
6,57	0,59

TR = Temperatura de resfriamento

TABELAS 15D a 18D: Dados de Tempo X Temperatura para o resfriamento individual dos exemplares 09 a 12.

TABELA 15D

EXEMPLAR 09
(TR = -17,0°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,99
2,00	0,96
3,00	0,91
4,00	0,84
5,00	0,79
6,00	0,73
7,00	0,68
8,00	0,63
8,88	0,59

TABELA 16D

EXEMPLAR 10
(TR = -17,0°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,96
2,00	0,89
3,00	0,82
4,00	0,75
5,00	0,69
5,20	0,63
7,00	0,57
7,66	0,53

TABELA 17D

EXEMPLAR 11
(TR = -17,0°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,98
2,00	0,93
3,00	0,88
4,00	0,82
5,00	0,76
6,00	0,70
7,00	0,64
8,00	0,60
9,00	0,55

TABELA 18D

EXEMPLAR 12
(TR = -15,5°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,91
2,00	0,83
3,00	0,76
4,00	0,69
5,00	0,62
5,92	0,57

TR = Temperatura de resfriamento

TABELAS 19D a 22D: Dados de Tempo X Temperatura para o resfriamento individual dos exemplares 13 a 16.

TABELA 19D

EXEMPLAR 13
(TR = -15,5°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,96
2,00	0,88
3,00	0,81
4,00	0,73
5,00	0,67
6,00	0,60
6,67	0,57

TABELA 20D

EXEMPLAR 14
(TR = -15,5°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,86
2,00	0,80
3,00	0,72
4,00	0,66
5,00	0,60
5,72	0,56

TABELA 21D

EXEMPLAR 15
(TR = -15,5°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,92
2,00	0,84
3,10	0,77
4,00	0,70
5,00	0,64
6,00	0,59
6,80	0,55

TABELA 22D

EXEMPLAR 16
(TR = -15,5°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,96
2,00	0,89
3,00	0,82
4,00	0,74
5,00	0,67
6,00	0,61
6,78	0,56

TR = Temperatura de resfriamento

TABELAS 23D a 26D: Dados de Tempo X Temperatura para o resfriamento individual dos exemplares 17 a 20.

TABELA 23D

EXEMPLAR 17
(TR = -13,6°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,10	0,96
2,00	0,90
3,00	0,82
4,00	0,74
5,00	0,68
6,00	0,61
7,00	0,56
7,47	0,53

TABELA 24D

EXEMPLAR 18
(TR = -13,6°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,98
2,00	0,94
3,00	0,88
4,00	0,82
5,00	0,76
6,00	0,70
7,00	0,65
8,00	0,60
9,00	0,55
9,53	0,53

TABELA 25D

EXEMPLAR 19
(TR = -13,6°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,96
2,00	0,89
3,00	0,81
4,00	0,74
5,00	0,67
6,00	0,60
7,00	0,55
7,45	0,53

TABELA 26D

EXEMPLAR 20
(TR = -13,6°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,94
2,00	0,85
3,00	0,77
4,00	0,69
5,00	0,62
5,20	0,60
7,00	

TR = Temperatura de resfriamento

TABELAS 27D a 30D: Dados de Tempo X Temperatura para o resfriamento individual dos exemplares 20 a 23.

TABELA 27D

EXEMPLAR 20
(TR = -13,6°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,98
2,00	0,91
3,00	0,84
4,00	0,77
5,00	0,70
6,00	0,64
7,00	0,59
8,00	0,54
9,18	0,53

TABELA 28D

EXEMPLAR 21
(TR = -13,6°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,90
2,00	0,81
3,00	0,73
4,00	0,66
5,00	0,60
6,00	0,54
6,63	0,51

TABELA 29D

EXEMPLAR 22
(TR = -11,9°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,97
2,00	0,90
3,00	0,82
4,00	0,74
5,00	0,67
6,00	0,60
7,00	0,54
7,52	0,51

TABELA 30D

EXEMPLAR 23
(TR = -11,9°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,98
2,10	0,91
3,00	0,85
4,00	0,78
5,00	0,71
6,00	0,64
7,00	0,58
8,17	0,52

TR = Temperatura de resfriamento

TABELAS 31D a 34D: Dados de Tempo X Temperatura para o resfriamento individual dos exemplares 24 a 27.

TABELA 31D

EXEMPLAR 24
(TR = -11,9°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,97
2,00	0,93
3,00	0,87
4,00	0,80
5,00	0,75
6,00	0,69
7,10	0,62
8,00	0,58
9,00	0,53
9,45	0,51

TABELA 32D

EXEMPLAR 25
(TR = -11,9°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,93
2,00	0,86
3,00	0,79
4,00	0,72
5,00	0,65
6,00	0,58
7,11	0,52

TABELA 33D

EXEMPLAR 26
(TR = -11,9°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,92
2,00	0,83
3,00	0,74
4,00	0,67
5,00	0,60
6,10	0,53

TABELA 34D

EXEMPLAR 27
(TR = -9,8°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,93
2,00	0,86
3,00	0,78
4,00	0,71
5,00	0,63
6,00	0,58
7,00	0,53
7,83	0,48

TR = Temperatura de resfriamento

TABELAS 35D a 38D: Dados de Tempo X Temperatura para o resfriamento individual dos exemplares 28 a 31.

TABELA 35D

EXEMPLAR 28
(TR = -9,8°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,93
2,00	0,83
3,00	0,75
4,00	0,67
5,00	0,54
6,00	0,48
7,17	

TABELA 36D

EXEMPLAR 29
(TR = -9,8°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,94
2,00	0,85
3,00	0,78
4,00	0,70
5,00	0,63
6,00	0,57
7,00	0,51
7,50	0,47

TABELA 37D

EXEMPLAR 30
(TR = -9,8°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,94
2,00	0,86
3,00	0,78
4,00	0,72
5,00	0,65
6,00	0,50
7,00	0,53
8,00	0,49

TABELA 38D

EXEMPLAR 31
(TR = -9,8°C)

t (min)	T
0,00	1,00
1,00	0,91
2,00	0,81
3,00	0,72
4,00	0,64
5,00	0,57
6,00	0,52
6,65	0,49

TR = Temperatura de resfriamento

APÉNDICE E

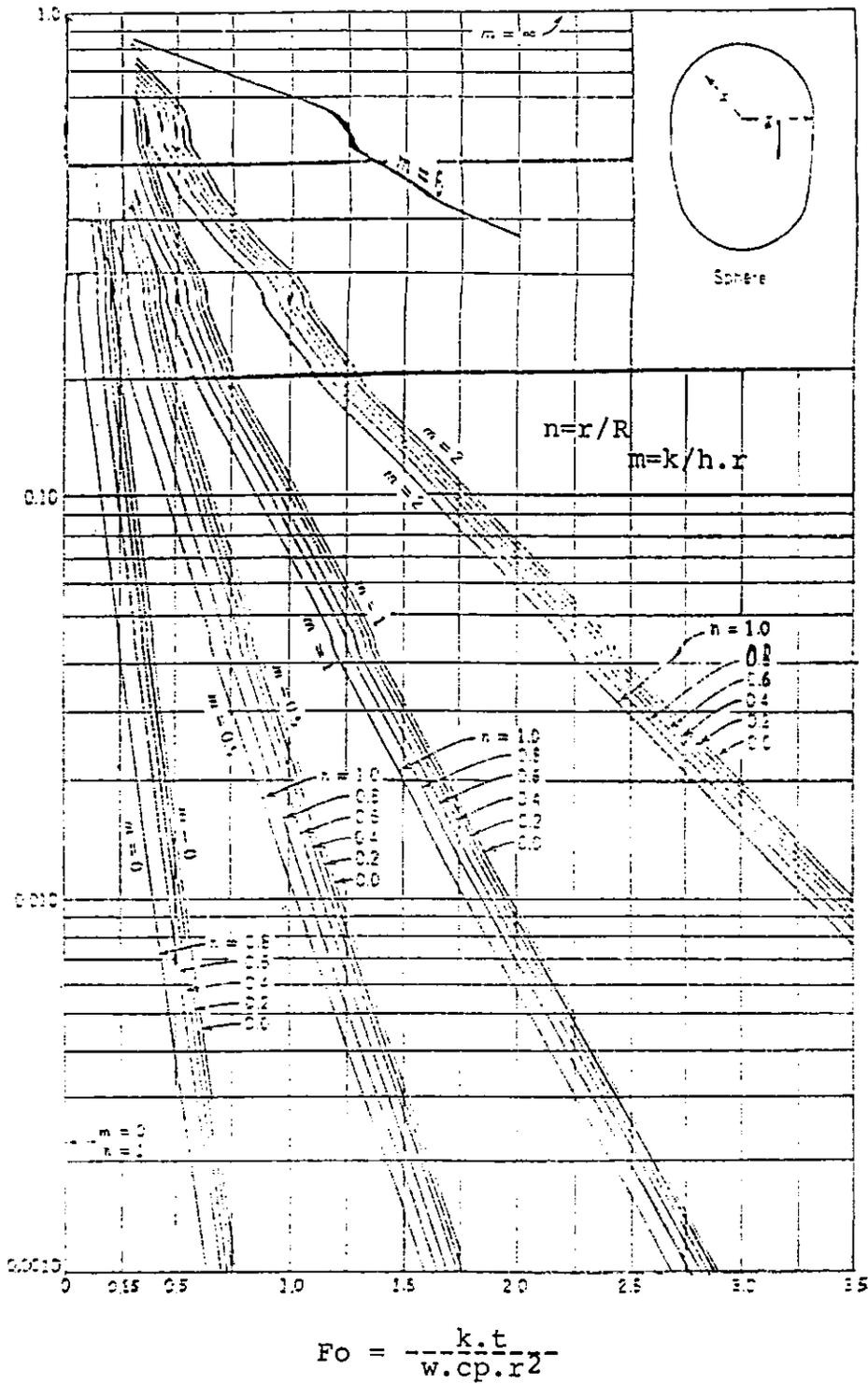


FIGURA 1E - Carta de Gurney-Lurie para esferas em mudanças bruscas de temperatura ($k/h.r = 0$)