

CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA PASTA DE MANDIOCA^{1/}

Evandro Ferreira Passos^{2/}
Mauri Fortes^{2/}
Jair Carlos Mello^{3/}

1. INTRODUÇÃO

O Programa Nacional do Álcool prevê, para os próximos anos, um aumento substancial da produção de álcool etílico. Várias matérias-primas deverão participar dessa produção, cabendo à mandioca uma posição privilegiada, em razão das grandes vantagens apresentadas por ela: grande concentração de carboidratos, pequeno consumo de energia de processamento, pouca exigência quanto à qualidade do solo, possibilidade de cultivo em todas as latitudes do território nacional, etc.

A condutividade térmica da pasta de mandioca é importante para o dimensionamento de vasos resfriadores agitados, cujos coeficientes de transferência de calor por convecção apresentam-se em termos de números adimensionais característicos, alguns dos quais são função da referida propriedade (9).

A medição da condutividade térmica dos materiais biológicos pode ser feita mediante métodos de regime estacionário e regime transitente. Os métodos de regime estacionário consistem, basicamente, em resolver as equações de condução de calor para regime estacionário em placas paralelas, cilindros e esferas concéntricas. Esses métodos não são adequados para a medição da condutividade térmica da pasta de mandioca por causa das variações químicas e bioquímicas que podem ocorrer durante as medições.

Os métodos de regime transitente consistem em resolver a equação de condução de calor para regimes transitentes com o uso de diferentes arranjos geométricos. Dos métodos apresentados na literatura, o método de DE VRIES (1), para so-

^{1/} Recebido para publicação em 12-11-1981.

^{2/} Departamento de Física da U.F.V. 36570 Viçosa, MG.

^{3/} Escola de Engenharia da UFMG. 30000 Belo Horizonte, MG.

los, readaptado por SWEAT (11), parece ser o mais adequado para materiais biológicos (3, 4, 10).

Para utilização desse método, a montagem consiste numa agulha hipodérmica, dentro da qual estão localizados um termopar e um fio aquecedor. Essa sonda é inserida na amostra cilíndrica e, quando o registrador está indicando uma temperatura constante, faz-se passar no fio aquecedor uma corrente elétrica, registrando-se a curva de aquecimento indicada pelo termopar.

A condutividade térmica da amostra é dada por (6)

$$K = \frac{Q \ell n (t_2/t_1)}{4 \pi (T_2 - T_1)} \quad (1)$$

sendo Q a potência por unidade de comprimento dissipada no fio aquecedor e T_1 e T_2 as temperaturas nos tempos t_1 e t_2 . Esta é a expressão para temperatura de uma fonte térmica linear colocada num meio infinito.

A expressão (1), em princípio, fornece os valores diretos da condutividade térmica. Entretanto, para compensar efeitos de comprimento da agulha, inércia térmica do sistema e outros erros, costuma-se acrescentar um termo de correção. Aconselha-se, todavia, a calibragem do sistema; para isso, emprega-se a glicerina. Em consequência dos pequenos intervalos de tempo e dos pequenos gradientes de temperatura envolvidos, o efeito relativo à convecção é desprezível (11).

2. MATERIAL E MÉTODOS

A sonda utilizada na determinação da condutividade térmica, similar à descrita por SWEAT (11), consistiu numa agulha hipodérmica, com um termopar em seu interior (ponto médio) e um fio aquecedor de constância enrolado do lado de fora. As sondas foram calibradas com glicerina, apresentando fatores de correção próximos da unidade (Figuras 1 e 2). Uma discussão mais ampla do método de construção e calibração encontra-se em PASSOS *et alii* (10).

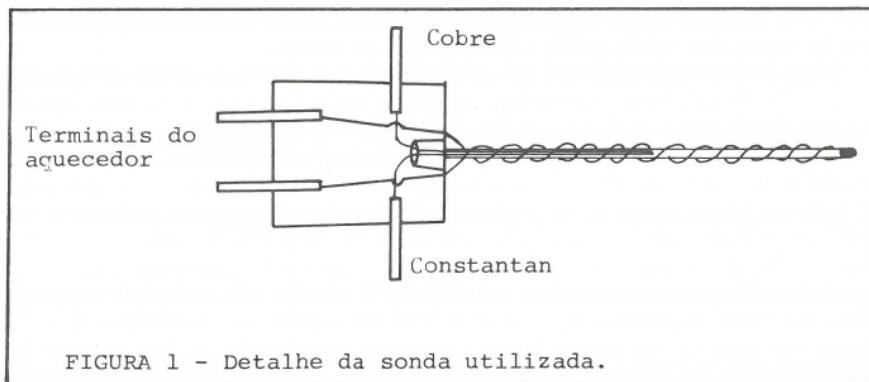


FIGURA 1 - Detalhe da sonda utilizada.

O sistema de aquisição de dados pode ser dividido em dois circuitos independentes: o do termopar (ligado em série à junta de referência e ao registrador) e o do aquecedor (ligado em série a um amperímetro, um reostato, uma fonte de corrente contínua e um interruptor). O registrador fornece uma taxa de leitura de duas contagens por segundo.

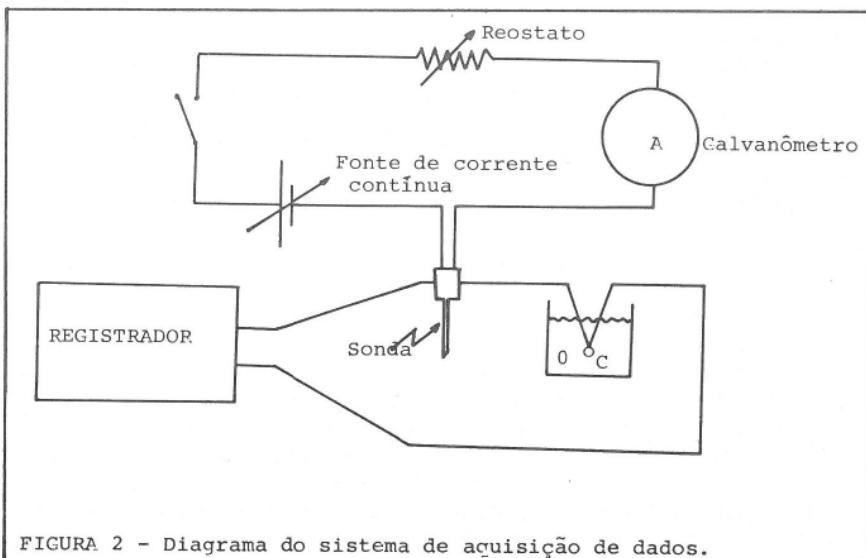


FIGURA 2 - Diagrama do sistema de aquisição de dados.

Em indústrias de álcool de médio e grande porte, diferentes variedades de mandioca poderão ser utilizadas simultaneamente. Assim, no estudo da condutividade térmica, considerando o teor de umidade, quatorze variedades de mandioca foram utilizadas, num total de 26 amostras, conforme o Quadro 1, para que se obtivessem resultados genéricos. Todas as amostras corresponderam a plantas de idade não inferior a 22 meses de plantio. Cada amostra foi descascada, ralada, misturada com água e cozida à pressão atmosférica durante uma hora. A seguir, adicionaram-se à pasta de mandioca as enzimas sacrificantes alfa-amilase (a cerca de 83°C) e amiloglucosidase (a cerca de 45°C), nas proporções adequadas. Após o resfriamento até à temperatura ambiente, foram realizadas as medições (5 repetições para cada amostra). O teor de umidade, base úmida, foi determinado mediante secagem em estufa, a $103 \pm 1^\circ\text{C}$, durante 24 horas.

Para efeitos comparativos, duas variedades de mandioca, 'Branca de Santa Catarina' e 'Rosa', foram estudadas, visando à análise estatística da diferença de condutividade térmica de suas pastas, para diferentes teores de umidade.

Procurou-se, também, obter dados preliminares que pudessem correlacionar os efeitos das enzimas sobre a condutividade térmica da pasta de mandioca. Nesse método, empregaram-se os mesmos procedimentos anteriores. Entretanto, as enzimas só foram adicionadas após o resfriamento da pasta de mandioca. Os dados obtidos dessa maneira refletiriam o efeito temporal da ação enzimática sobre a pasta, à temperatura ambiente. A dificuldade técnica de controle de temperaturas da pasta superiores às ambientes e as características não-newtonianas da pasta não permitiram que se fizesse um estudo das atividades das enzimas em suas temperaturas ótimas de atuação.

Dada a impossibilidade de repetir o experimento exatamente, adotou-se o critério de Chauvenet para que alguns dos resultados fossem descartados. Esse critério, utilizado para eliminar dados com alta probabilidade de ser inválidos, é discutido minuciosamente por HUGGINS (7) e por HOLMAN (5). No caso de regressão linear, deve-se calcular o desvio-padrão de um \hat{y} predito para determinado x através de

$$S_{\hat{y}} = S \left\{ 1 + \frac{1}{N} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2} \right\} \frac{1}{2} \quad (2)$$

S refere-se ao desvio-padrão da regressão,

N é o número de observações e \bar{x} é a média dos dados obtidos para a variável independente.

QUADRO 1 - Condutividades térmicas de pastas de várias variedades de mandioca

Nº da variedade	Umidade (%)	K (W.m ⁻¹ .°C ⁻¹)
6	75,8	0,420
6	76,6	0,440
1	76,8	0,449
6	77,1	0,446
14	77,8	0,462
12	78,2	0,414
2	78,4	0,473
6	78,5	0,449
1	78,5	0,454
1	79,5	0,461
5	79,6	0,449
13	80,5	0,469
10	80,8	0,472
11	81,0	0,457
6	81,1	0,444
3	81,1	0,468
9	81,9	0,451
4	85,0	0,466
1	86,2	0,494
1	86,6	0,484
6	86,6	0,487
6	86,7	0,462
7	87,4	0,512
9	87,8	0,477
6	88,7	0,488
8	90,6	0,501

Variedades de mandiocas estudadas:

- | | |
|-----------------------------|----------------------|
| 1. Branca de Santa Catarina | 8. Clone 452-54-6 |
| 2. Cacau Branco | 9. SFG - 696 |
| 3. Sinhá-Está-na-Mesa | 10. Desconhecida I |
| 4. Santinha | 11. IAC - 352-6 |
| 5. Periquita | 12. Desconhecida II |
| 6. Rosa | 13. Desconhecida III |
| 7. SFG - 444 | 14. Desconhecida IV |

O intervalo de confiança (I.C.) de 95% para uma nova observação, que está centrada em \hat{y}_k e cujo comprimento depende da estimativa de $S_{\hat{y}}$, é dado por (2):

$$IC: \hat{Y}_k \pm S_{\hat{y}} t(N - 2; 0,975)$$

em que $N - 2$ corresponde ao número de graus de liberdade e 0,975 é a porcentagem de ponto de uma distribuição t .

Dado um número de observações, o critério de Chauvenet fornece uma razão do desvio máximo aceitável para o desvio-padrão calculado. Essas razões podem ser obtidas da literatura (5).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Quadro 1 mostra os valores médios de condutividade térmica de pastas de diferentes variedades de mandioca. Os resultados representam médias de cinco repetições. Os dados mostram que as condutividades térmicas das pastas de mandioca encontram-se entre $0,420$ e $0,501 \text{ W.m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ e crescem de acordo com o teor de umidade.

A Figura 3 mostra as linhas de regressão para as variedades 'Rosa' e 'Branca de Santa Catarina', separadas e conjuntamente. As equações obtidas foram as seguintes:

— Variedade 'Rosa':

$$K = 0,1236 + 4,066 \times 10^{-3}U$$

$$r = 0,9030$$

— Variedade 'Branca de Santa Catarina':

$$K = 0,1263 + 4,196 \times 10^{-3}U$$

$$r = 0,9761$$

— Para as duas variedades:

$$K = 0,1289 + 4,130 \times 10^{-3}U$$

$$r = 0,8815$$

Nas expressões anteriores, a condutividade térmica (K) deve ser expressa em $\text{W.m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ e o teor de umidade (U) em porcentagem, base úmida.

Não houve diferença significativa, ao nível de 5% de probabilidade, entre as condutividades térmicas das variedades 'Rosa' e 'Branca de Santa Catarina'.

Uma regressão linear, para todas as variedades, fornece

$$K = 0,1209 + 4,184 \times 10^{-3}U \quad (7)$$

$$r = 0,7976$$

Não é possível expressar, em termos estatísticos, uma diferença significativa entre as condutividades térmicas das diferentes pastas, por falta de dados complementares para variedades diferentes das já citadas, 'Rosa' e 'Branca de Santa Catarina'. Vê-se na Figura 4 o gráfico correspondente. A expressão (7) deverá ser útil para cálculos em usinas de álcool que trabalham com diversas variedades.

O efeito típico da ação enzimática sobre a condutividade da pasta de mandioca de uma variedade desconhecida acha-se na Figura 5.

O decaimento da condutividade térmica da pasta de mandioca, à temperatura ambiente, com o tempo é bastante atípico. As enzimas sacarificantes alfa-amilase e glucosidase apresentam um máximo de atividade às temperaturas de 83°C e 45°C , respectivamente. O decaimento poderia, em princípio, ser consequência da ação enzimática à temperatura ambiente ou ao fato de ser a pasta de mandioca um fluido não-newtoniano.

Por fugir ao escopo deste trabalho, não se tentou postular qualquer explicação fenomenológica para a variação da condutividade térmica com a ação enzimática. Requer-se mais trabalho para caracterização fenomenológica da ação enzimática.

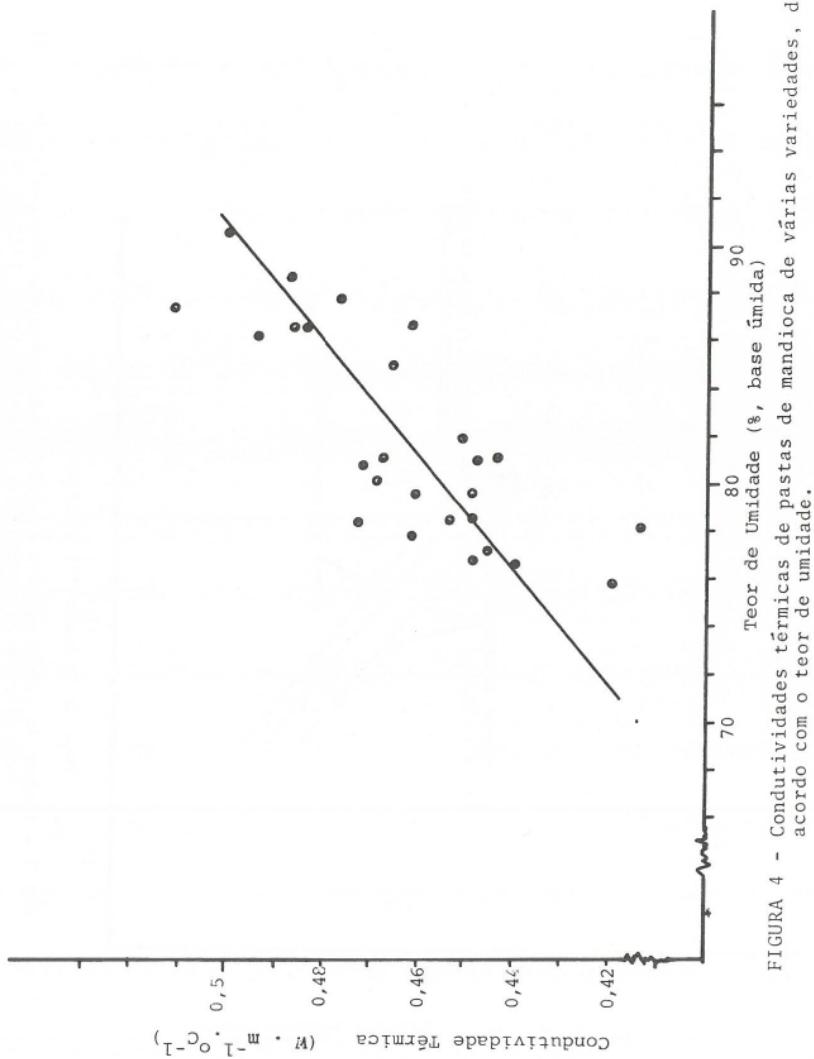


FIGURA 4 - Condutividades térmicas de pastas de mandioca de várias variedades, de acordo com o teor de umidade.

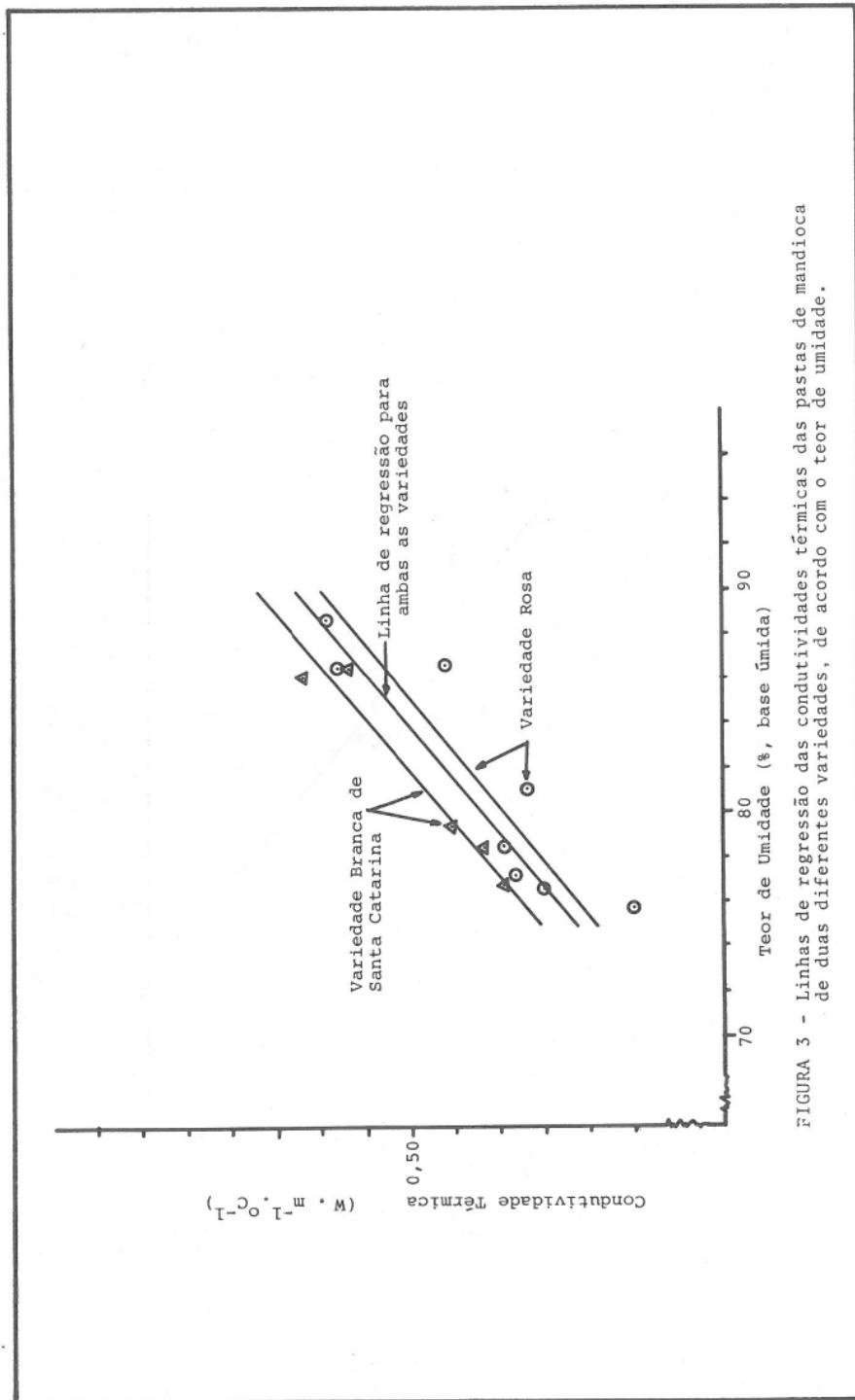


FIGURA 3 - Linhas de regressão das condutividades térmicas das pastas de mandioca de duas diferentes variedades, de acordo com o teor de umidade.

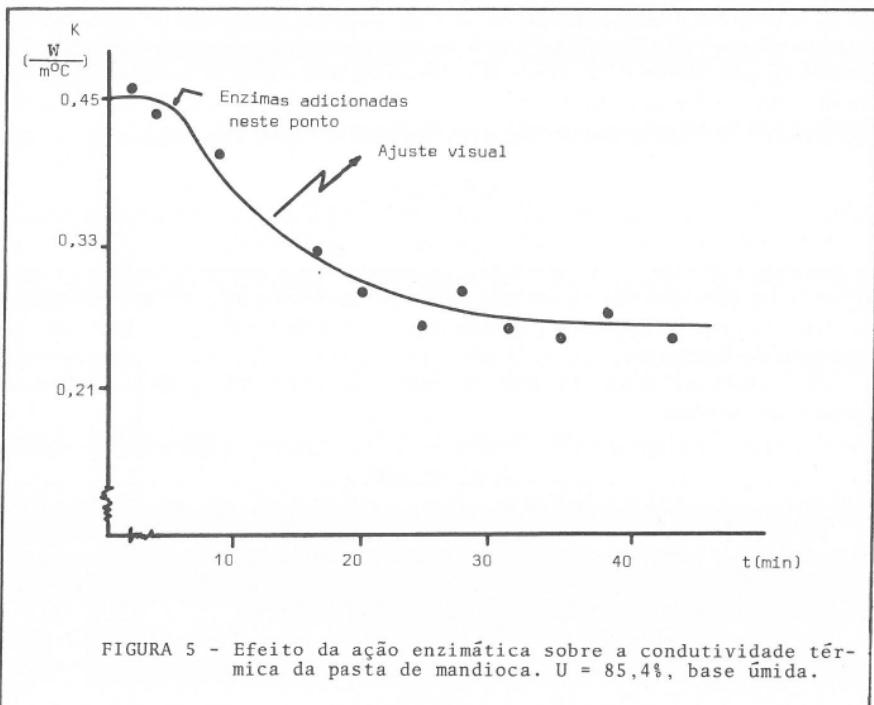


FIGURA 5 - Efeito da ação enzimática sobre a condutividade térmica da pasta de mandioca. $U = 85,4\%$, base úmida.

A pasta de mandioca é um fluido não-newtoniano, não homogêneo e anisotrópico. Sua condutividade térmica é influenciada por parâmetros tais como temperatura, ação enzimática, método de adubação, composição da raiz, etc. A composição da mandioca varia com o tempo de colheita, local de plantio, distribuição de chuvas, método de adubação, etc. Depois do tempo ótimo de colheita (cerca de 18 meses), começa um processo de hidrólise na raiz, aparentemente por motivo de regeneração da planta (as folhas começam a cair).

A glicose amorfa apresenta uma condutividade térmica maior que a do amido: k (glicose) = $0,341 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ (12) e k (amido) = $0,15 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ (8). Posser-se-ia supor que o efeito da ação enzimática seria o de aumentar a condutividade térmica da pasta. Entretanto, tal efeito não foi observado nos experimentos. O gráfico da Figura 5 mostra que a ação enzimática provoca uma diminuição da condutividade térmica da pasta, especialmente nos primeiros 30 minutos após a adição das enzimas. Deve-se observar que, nesses experimentos, os valores encontrados para a condutividade térmica da pasta, antes da adição das enzimas, praticamente coincidem com os valores previstos pela equação (6), ou seja, a condutividade térmica da pasta cozida e resfriada é a mesma, independentemente de terem sido adicionadas (ou não) as enzimas, nas temperaturas indicadas.

A ação enzimática depende, principalmente, da atividade e da quantidade adicionada de enzimas (além da temperatura, da composição do substrato, etc.). Com o rompimento da cadeia de amido, há produção de moléculas de diversos

tamanhos: dextrinas, oligossacarídeos, maltose, isomaltose, glucose, etc. A ação enzimática decresce ao longo do tempo.

A ação enzimática vai influir no teor de umidade. Moléculas de água são incorporadas aos carboidratos na formação das moléculas de glicose. Uma amostra hipotética, por exemplo, com teor de umidade de 80% e 20% de amido, apresentará, após uma ação enzimática completa, um teor de umidade de 77,7%, pois 2,3% de umidade terão sido incorporados às moléculas de glicose.

4. RESUMO

Este trabalho apresenta expressões para condutividades térmicas de pastas de mandioca de diferentes variedades, de acordo com o teor de umidade. As condutividades térmicas das variedades foram comparadas e uma análise estatística mostrou não existir diferença significativa, ao nível de confiança de 5%, entre as equações de regressão.

Um estudo preliminar do efeito de enzimas sobre a condutividade térmica da pasta é apresentado.

5. SUMMARY

Thermal conductivities of pastes of different varieties of cassava were measured as functions of moisture content. The thermal conductivities of two different varieties were compared and a statistical analysis yielded no significant difference at the 5% significance level between the regression equations.

A preliminary study on the effect of enzymes on paste thermal conductivity is presented.

6. LITERATURA CITADA

1. DE VRIES, D.A. Some remarks on heat transfer by vapor movement in soils. *Trans. 4th Internat. Cong. Soil Sci.* 2:38-41, 1950.
2. DRAPER, N.R. & SMITH, H. *Applied regression analysis*. New York, John Wiley and Sons, 1966. 407 p.
3. FORTES, M. & OKOS, M.R. Changes in physical properties of corn during drying. *Trans. of the ASAE*, 23(4):1004-1008, 1980.
4. FORTES, M. & OKOS, M.R. Heat and mass transfer in higroscopic capillary extruded products. *AICHE Journal*, 27(2):255-262, 1981.
5. HOLMAN, J.R. *Experimental methods for engineers*. 2nd. ed. New York, McGraw-Hill, 1971. 423 p.
6. HOOPER, F.C. & LEPPER, F.R. Transient heat flow apparatus for the determination of thermal conductivities. *Trans. of American Society of Heating and Ventilating Engineers*, 56:309-324, 1950.
7. HUGGINS, L.F. Analysis and interpretation. In: ZACHARY, A. ed. *Instrumentation and Measurement for Environmental Sciences*. Michigan, American Society of Agricultural Engineers, 1975. 212 p.

8. LONCIN, M. & MERSON, R.L. *Food engineering — Principles and selected applications*. New York, Academic Press, 1979. 494 p.
9. NAGATA, SHINJI. *Mixing — Principles and applications*. Tokyo, John Wiley & Sons, 1975. 503 p.
10. PASSOS, E.F., MELLO, J.C. & FORTES, M. *Desenvolvimento de métodos de medida de condutividade térmica de materiais biológicos*. Viçosa, 1982. 13 p. datilog.
11. SWEAT, V.E. & HAUGH, C.G. A thermal conductivity probe for small food samples. *Trans of the ASAE*, 17(1):56-58, 1974.
12. WOODAMS, E.E. & NOWREY, J.E. Literature values of thermal conductivities of foods. *Food Technology*, 22:494-502, 1968.