

Curvas de secagem

A água nos alimentos

Água livre

A água fracamente ligada ao substrato, e que funciona como solvente, permitindo o crescimento dos microrganismos e reações químicas e que é eliminada com relativa facilidade.

Água ligada

A água está fortemente ligada ao substrato, mais difícil de ser eliminada e que não é utilizada como solvente e não permite o desenvolvimento de microrganismos e retarda as reações químicas.

Actividade da água (a_w)

a_w - Indica a intensidade das forças que unem a água com outros componentes não-aquosos e, conseqüentemente, a água disponível para o crescimento de microrganismos e para que se possam realizar diferentes reações químicas e bioquímicas.

Actividade de água (a_w): Relação entre a pressão de vapor de água em equilíbrio sobre o alimento (P_w) e a pressão de vapor da água pura (P_v), à mesma temperatura, **que expressa o teor de água livre no alimento.**

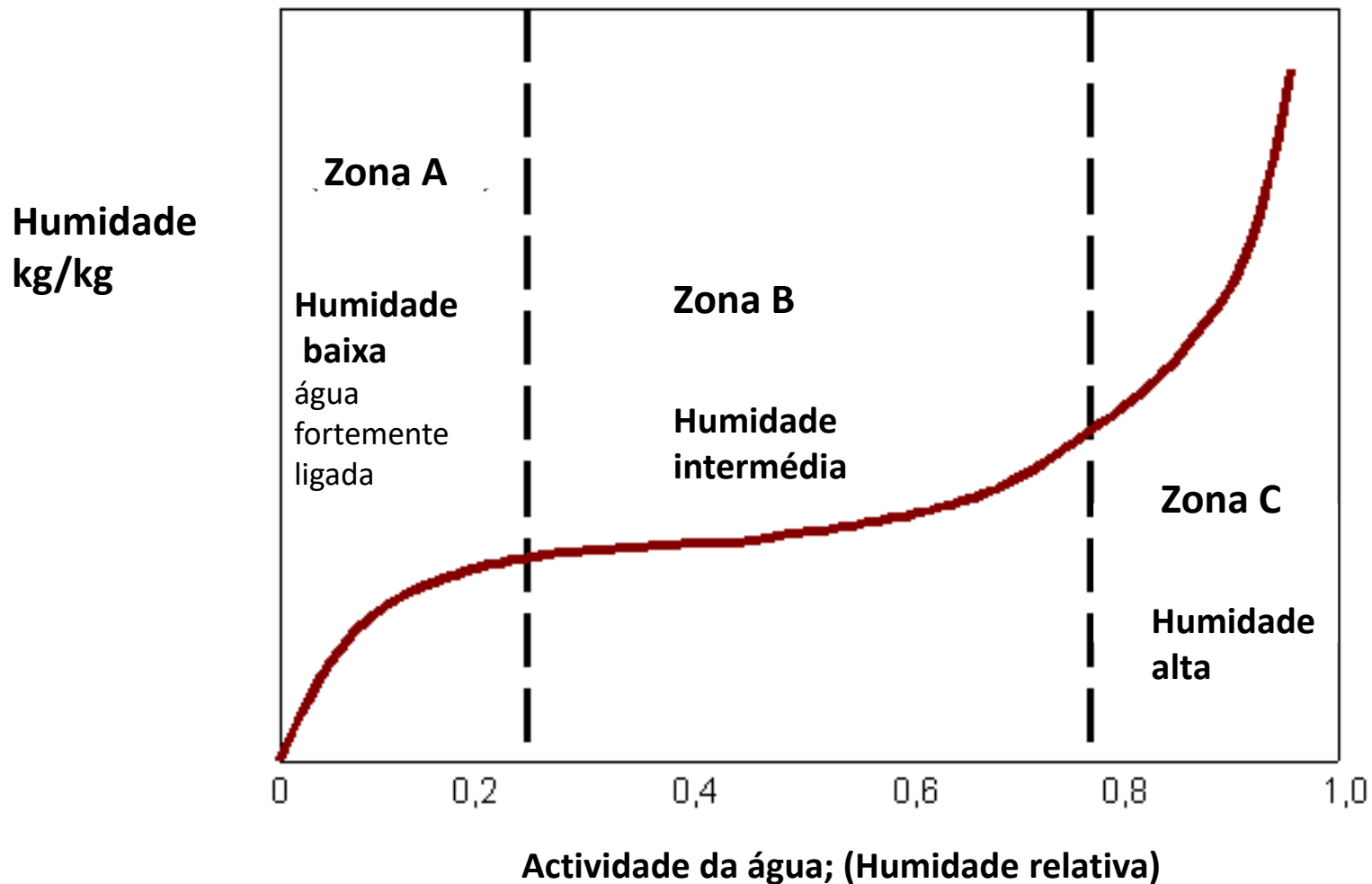
$$a_w = \frac{P_w}{P_v} = \frac{WR}{100}$$

P_w = Pressão parcial de vapor de água no alimento

P_v = Pressão de vapor da água pura à mesma temperatura

WR – humidade relativa do ar

A a_w de um alimento e a humidade relativa do ambiente no qual se encontra tendem sempre a equilibra-se e por isso, é comum expressar-se como humidade relativa de equilíbrio.



Zona A. água fortemente ligada corresponde a **aw de 0,2-0,3** ou inferior:

Zona B: Água moderadamente ligada (**aw = 0,3-0,7**)

Zona C: Água pouco ligada: corresponde a uma **aw de 0,7-0,8** ou superior.

Valores da a_w :

- O valor máximo da actividade de água é **1** na água pura.
- Alimentos com valores de actividade de água altos (acima de 0,90): \Rightarrow sofrer contaminação microbiológica, uma vez que as soluções diluídas dos alimentos servem de substrato para o crescimento de microrganismos.
- Para valores entre **0,40-0,80**, as reacções químicas e enzimáticas ficam favorecidas.
- Quando a actividade de água alcança valores **inferiores a 0,30** atinge-se a zona de adsorção primária na qual não há dissolução dos componentes do alimento pela água, o que reduz a velocidade das reacções.
- **Em termos gerais: diminuindo-se a $a_w \Rightarrow$ conserva-se mais o alimento**

Higroscopicidade — Curvas Higroscópicas

Os materiais porosos expostos a determinada temperatura e humidade relativa, trocam vapor de água com o ar ambiente até atingirem o **ponto de equilíbrio**.

A **higroscopicidade** representa a capacidade dos materiais adsorverem e restituírem água existente no ambiente.

Os materiais podem conter água em diferentes quantidades para diferentes situações de temperatura e humidade do ambiente.

Assim, é possível definir o valores do teor de **humidade de equilíbrio** do material para diferentes condições de humidade para uma dada temperatura constante

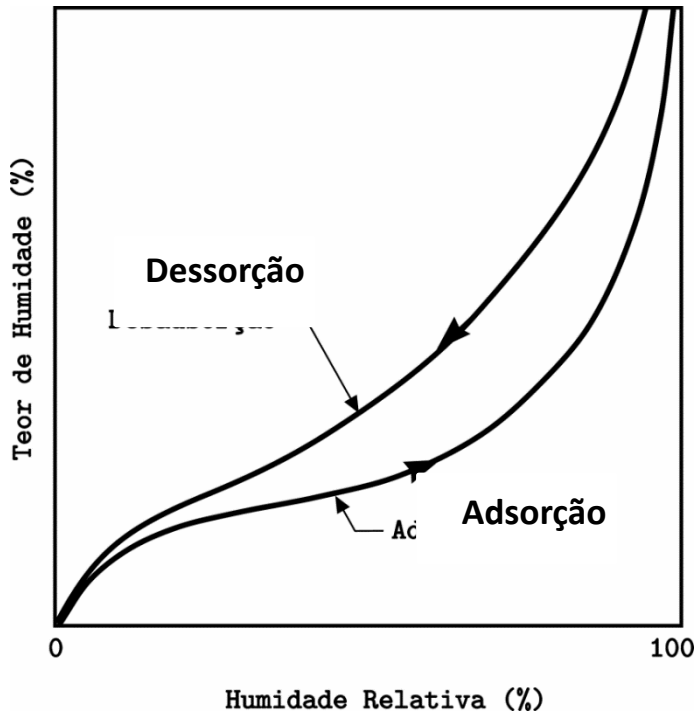
No equilíbrio, existe uma relação entre a actividade da água (a_w) de um alimento e a humidade relativa (WR) do ar (expressa em %), num ambiente fechado

A relação entre o teor de humidade de equilíbrio e a humidade relativa ou a_w denomina-se curva higroscópica (ou simplesmente isotérmica).

Isotérmicas de equilíbrio

- A temperatura cte. e em condições de equilíbrio, existe uma única relação entre o teor de água e a humidade do alimento

A curva obtida – humidade relativa *versus* o teor de humidade de equilíbrio do sólido chama-se isotérmica de adsorção ou dessorção



Adsorção

- processo de aumento da água no alimento

Dessorção

- processo de redução da água no alimento

Histerése

- qd as isotérmicas não se sobrepõem.

Estas curvas não são usualmente coincidentes apresentando uma histerese. Isto significa que **para uma dada humidade relativa, existem dois teores de humidade de equilíbrio do sólido.**

Teor de humidade de equilíbrio

Se se mantiver uma matéria sólida em contacto com ar a uma temperatura, pressão total e humidade relativa constantes, por um tempo indefinido, o teor de humidade da matéria sólida tende para um valor constante a que se chama **humidade de equilíbrio X**.

Na situação de equilíbrio termodinâmico, a pressão de vapor exercida pela água contida no interior do sólido é idêntica à pressão parcial de vapor da atmosfera envolvente, correspondendo à humidade relativa e temperatura existentes.

Para uma dada temperatura e humidade relativa, **o teor de humidade de equilíbrio (X)**, é função da **matéria sólida e sua estrutura interna**.

Quando se coloca um alimento numa ambiente com humidade relativa (WR) superior à humidade de equilíbrio \Rightarrow ele tende a alcançar o equilíbrio, isto é, adsorver água (adsorção).

Ao contrário, se o alimento é colocado num ambiente cuja humidade relativa (WR) inferior à humidade de equilíbrio \Rightarrow ele cede água mediante o processo chamado dessorção.

A **humidade de equilíbrio** é a **humidade limite** a que um **sólido** pode ser **seco** para uma **determinada condição de temperatura e humidade do ar**.

Mantida a temperatura do sistema sólido-gás e variando-se a humidade relativa do ar, podemos obter, para cada valor desta variável, um teor de humidade de equilíbrio do sólido.

O conjunto dos pontos de humidades de equilíbrio a diferentes humidades relativas do ar é denominado **isotermica de equilíbrio**.

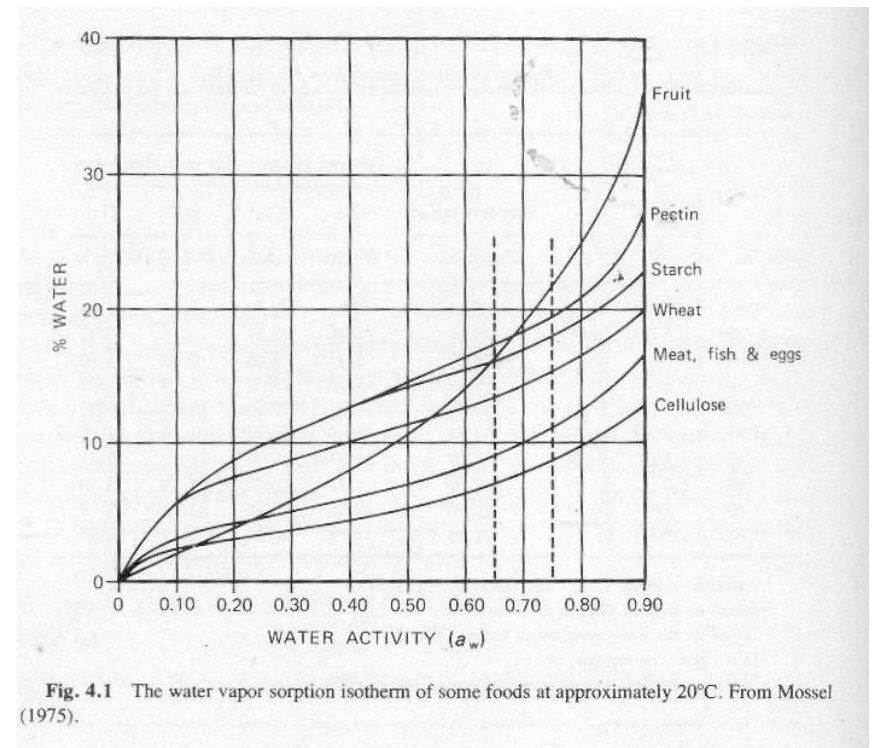
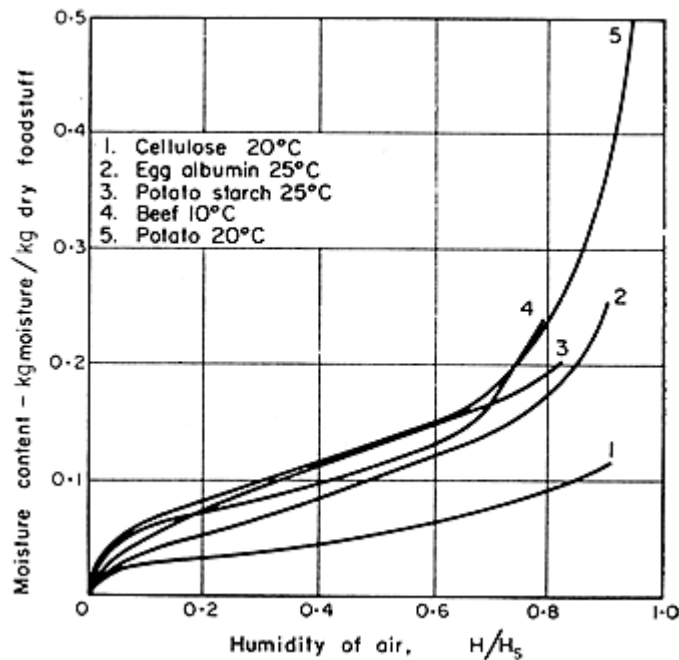


Fig. 4.1 The water vapor sorption isotherm of some foods at approximately 20°C. From Mossel (1975).

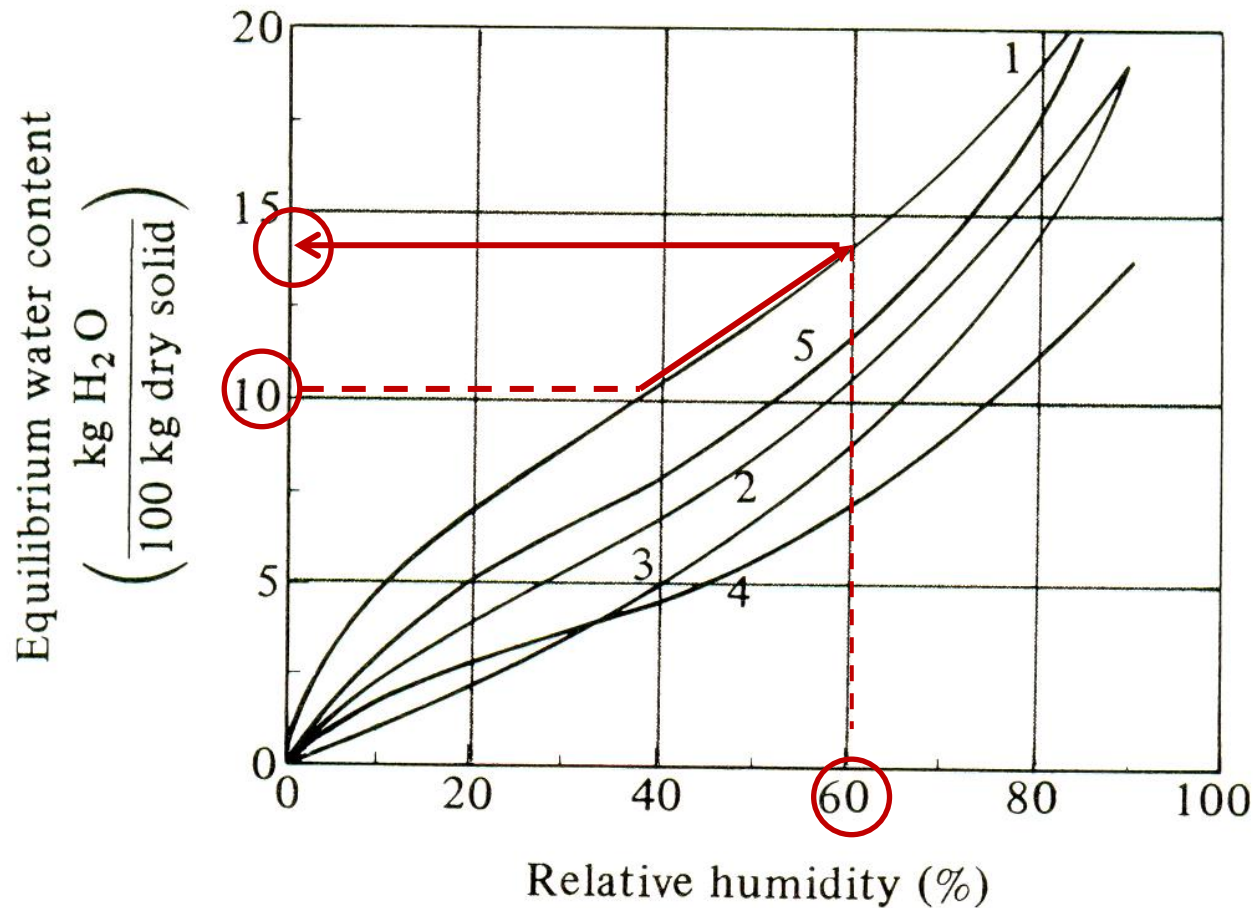


FIGURE 9.4-2. Typical equilibrium moisture contents of some food materials at approximately 298 K (25°C). (1) macaroni, (2) flour, (3) bread, (4) crackers, (5) egg albumin. [Curve (5) from ref. (E1). Curves (1) to (4) from National Research Council, *International Critical Tables*, Vol. II. New York: McGraw-Hill Book Company, 1929. Reproduced with permission of the National Academy of Sciences.]

Secagem

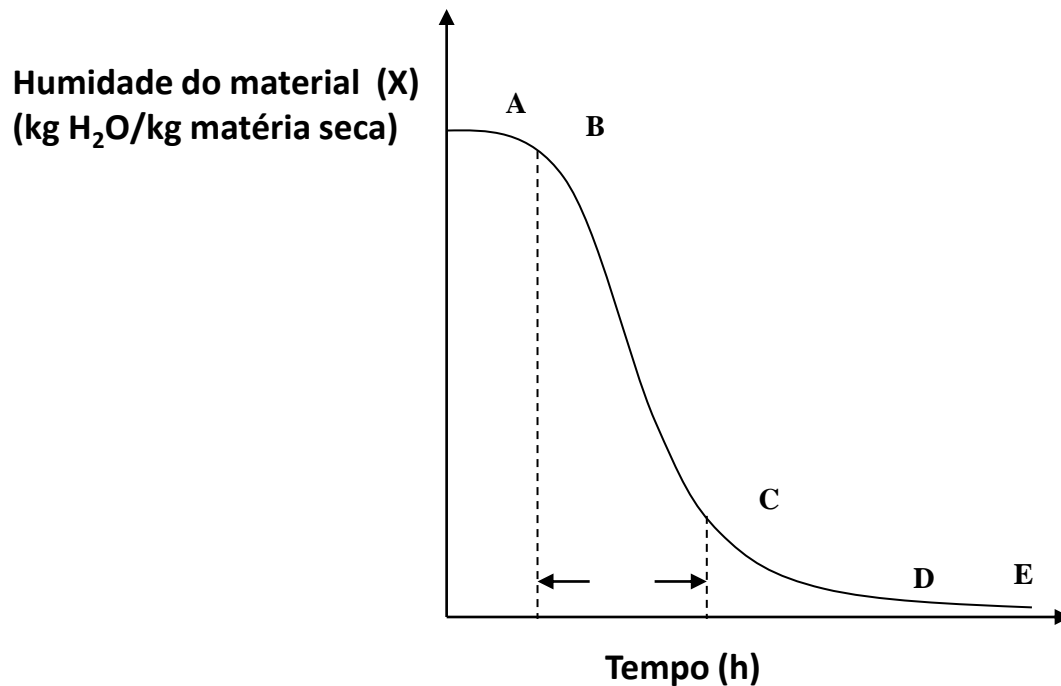
- **Implica 4 processos de transporte**

1. **Transferência de calor** do ar até a superfície do sólido
 - por convecção e/ou radiação
2. **Transferência de calor** desde a superfície do sólido até ao interior do sólido
 - por condução em regime transiente
3. **Transferência de massa** no sólido
 - por difusão (\neq de concentração, c / humidade até 25%)
 - ou capilaridade (\geq 65% de humidade)
4. **Transferência de vapor** desde a superfície do sólido para o ar
 - depende da temperatura do ar, humidade, caudal, superfície do alimento e pressão

Períodos de Secagem

- implica 3 fases

1. Pré-aquecimento
2. Período de velocidade de secagem constante
3. Uma ou mais fases de velocidade de secagem decrescente



Mecanismo de secagem

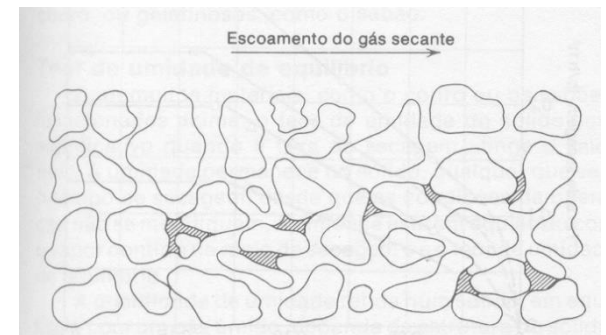
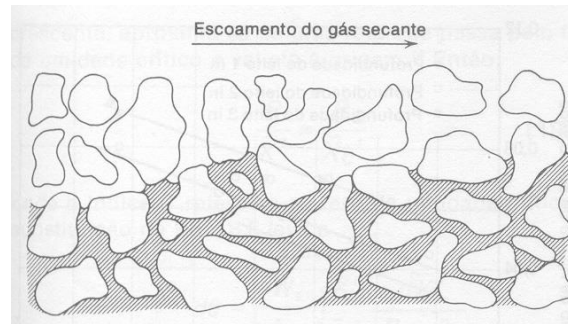
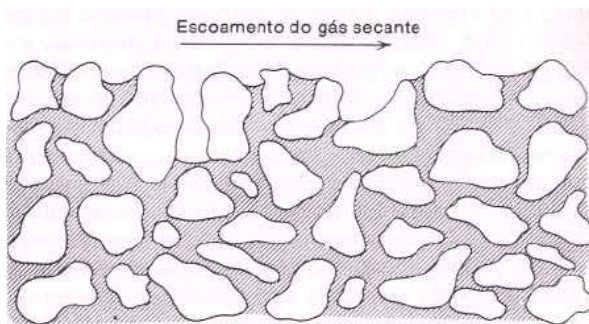
Quando ocorre a evaporação da água na superfície de um sólido, a humidade desloca-se das camadas internas do sólido para a superfície.

A força motriz para o transporte de água é a diferença de pressão de vapor ($P_s - P_a$)

P_s - pressão de saturação da água à temperatura da superfície

P_a - pressão parcial de vapor da água na corrente de ar quente

Este movimento da água exerce papel importante na secagem durante o **período de velocidade decrescente** e dependendo do tipo de material pode ocorrer através de dois mecanismos: ***difusão*** e ***capilaridade***

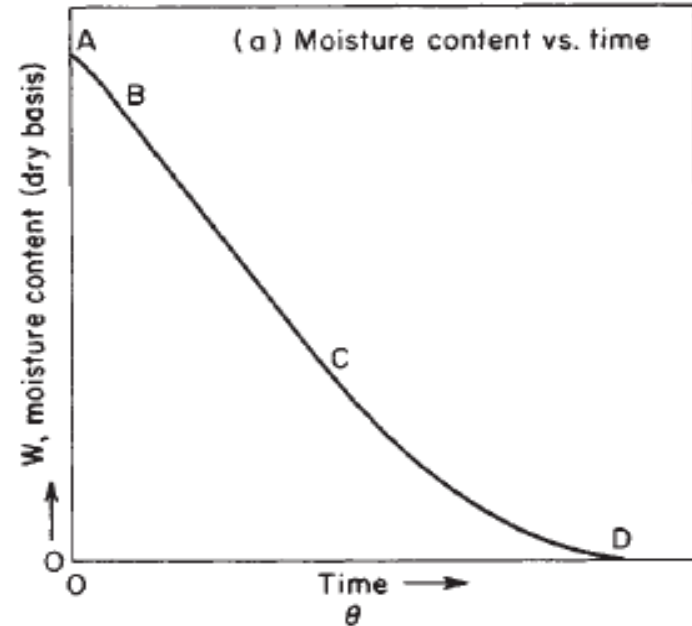


<https://www.youtube.com/watch?v=sxAb2PMsnQ0>

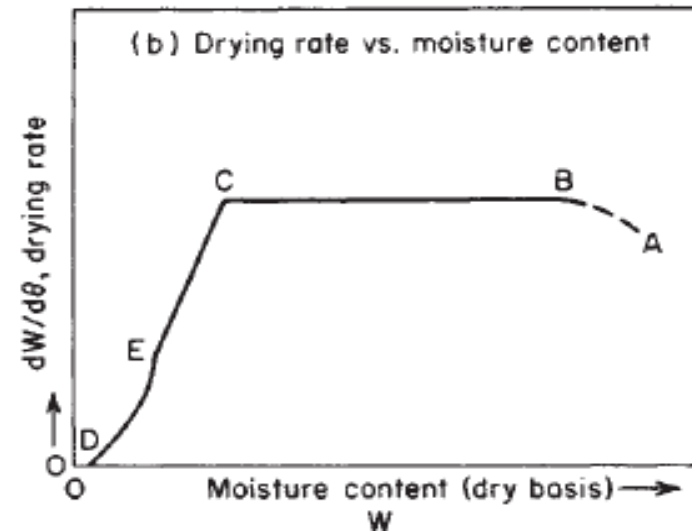
Curvas de secagem

É habitual representar graficamente os ensaios de secagem, por intermédio das chamadas curvas de secagem que são de dois géneros:

- Teor de humidade média (na base seca) *versus* tempo



- Taxa (velocidade) de evaporação *versus* teor de humidade média (na base seca), designada por curva da cinética da secagem.



Vídeo sobre secagem de alimentos:

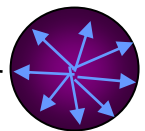
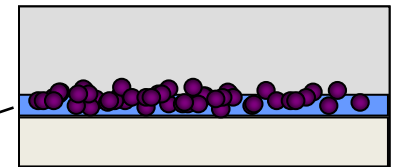
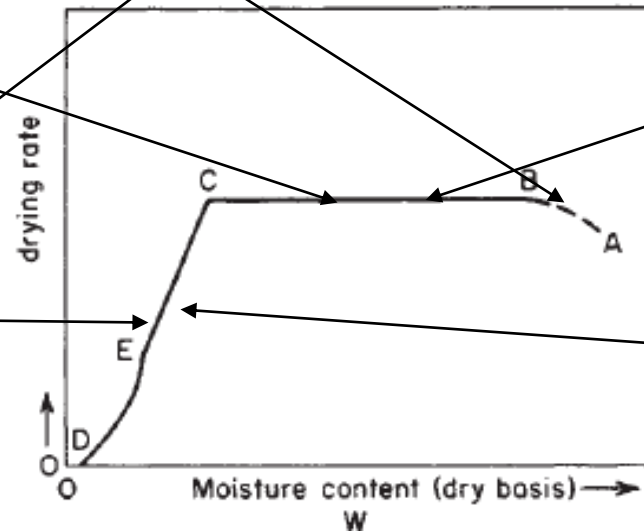
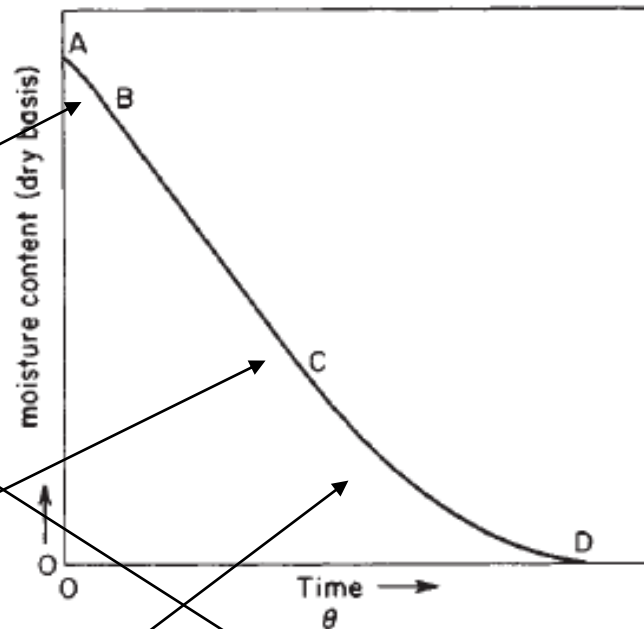
<https://www.youtube.com/watch?v=sxAb2PMsnQ0>

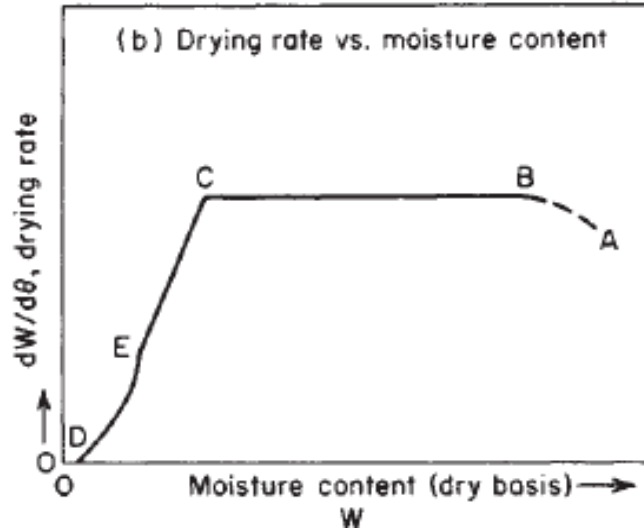
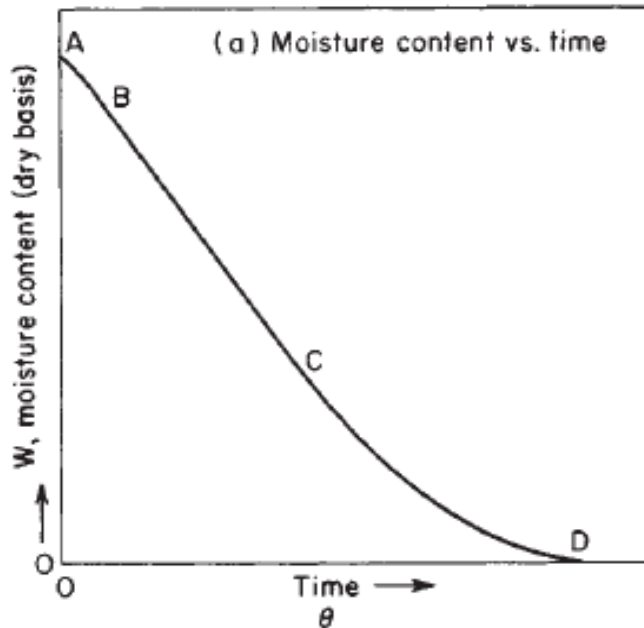
Secagem

Aquecimento

Velocidade constante

Velocidade decrescente





Fases do processo de secagem

A-B – Período inicial

A temperatura da superfície aumenta ou diminui até à temperatura do termómetro húmido.

B –C -Período de velocidade constante

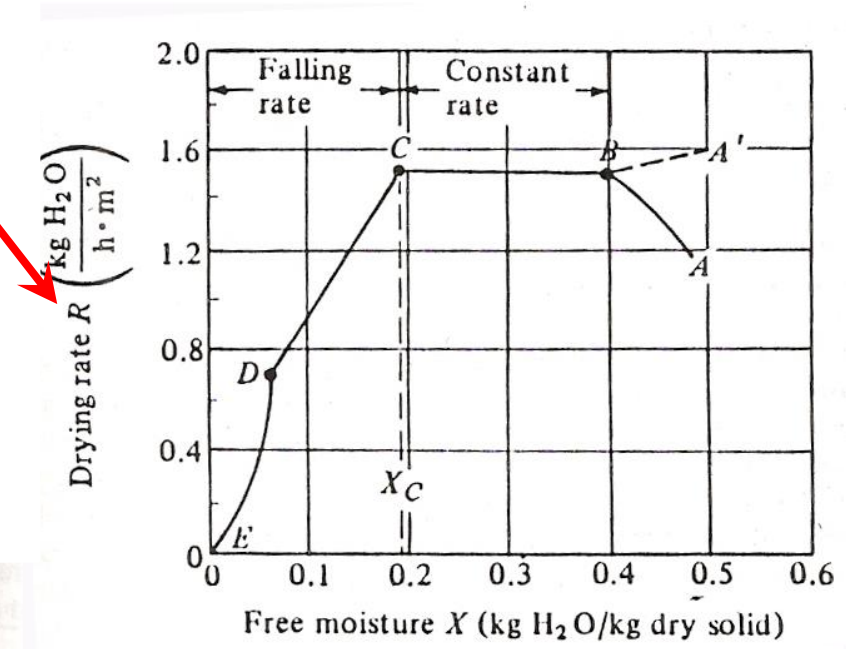
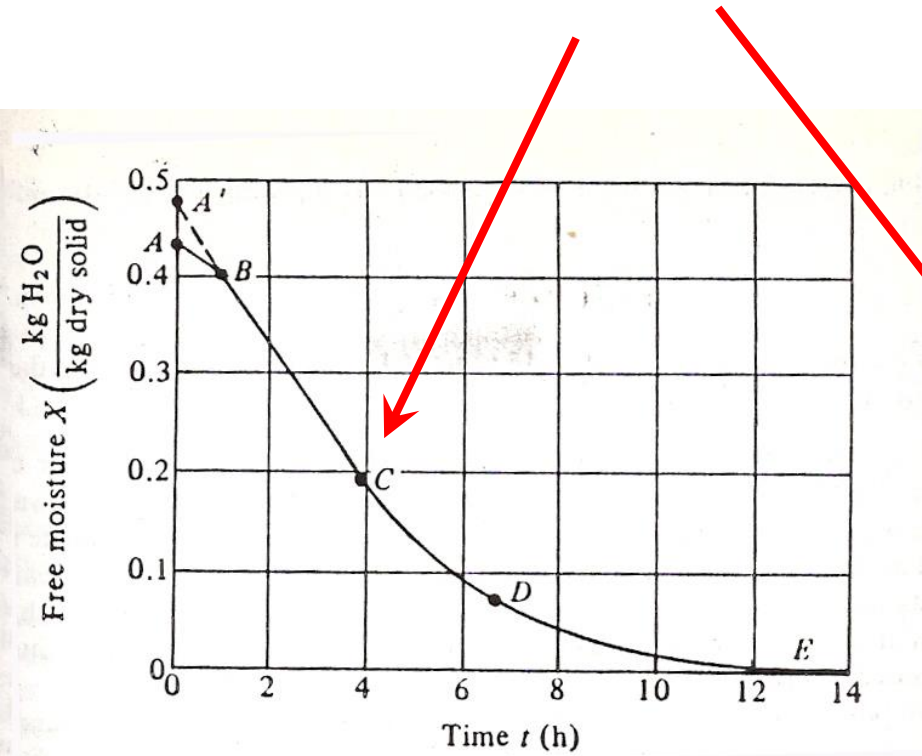
A água é transportada do interior dos sólidos à mesma velocidade que se evapora na superfície. A superfície mantém-se húmida, à temperatura do termómetro húmido.

C- E – Período de velocidade decrescente

Quando a humidade nos sólidos atinge um valor **crítico (ponto C)**, a velocidade de secagem começa a diminuir. A velocidade de transferência de água até à superfície é inferior à velocidade de evaporação. Se a quantidade de calor fornecida pelo ar for constante, a temperatura da superfície sobe até atingir a temperatura do ar.

No final deste período o produto estará em equilíbrio com o ar e a velocidade de secagem é nula

Declive = R = Velocidade de secagem



$$R = -\frac{m_s}{A} \frac{dX}{dt}$$

X = humidade do material (kg água/kg matéria seca)

R = velocidade de secagem (kg água/h.m²)

m_s = kg de matéria seca

A = Área exposta (m²)

Curva de secagem

Exemplo: 500 g de maçã cortada em fatias com 1 cm de espessura ocupam um tabuleiro de 0,5 m² de área num secador.

Temperatura do ar de secagem é de 50°C

Humidade da amostra (base húmida) 90 % .

Humidade final 15 % b.h.

Acompanhamento da secagem:

Tempo (h)	Massa (g)	Tempo (h)	Massa (g)
0	500	7,5	94,6
1	410	10	84,7
2	320	12,5	76,3
3	230	20	58,6
4	140	40	52,8
5	107,5	60	52,5

Tempo (h)	Massa (g)	Humidade base seca (%)	Tempo (h)	Massa (g)	Humidade base seca (%)
0	500	900	7,5	94,6	89,2
1	410	720	10	84,7	69,4
2	320	540	12,5	76,3	52,6
3	230	360	20	58,6	17,2
4	140	180	40	52,8	5,6
5	107,5	115	60	52,5	5

Humidade da maçã

Por exemplo para o instante $t = 5$ h, a massa total é de 107,5 g

sabendo que a massa seca é de 50 g, a massa de água será $107,5 - 50 = 57,5$ g (no instante 5 h.)

Humidade base seca = $57,5/50 \times 100 = 115\%$

Humidade base húmida = $57,5/107,5 \times 100 = 53,5 \%$.

Tempo (h)	Massa (g)	Humidade base seca (%)	Tempo (h)	Massa (g)	Humidade base seca (%)
0	500	900	7,5	94,6	89,2
1	410	720	10	84,7	69,4
2	320	540	12,5	76,3	52,6
3	230	360	20	58,6	17,2
4	140	180	40	52,8	5,6
5	107.5	115	60	52,5	5

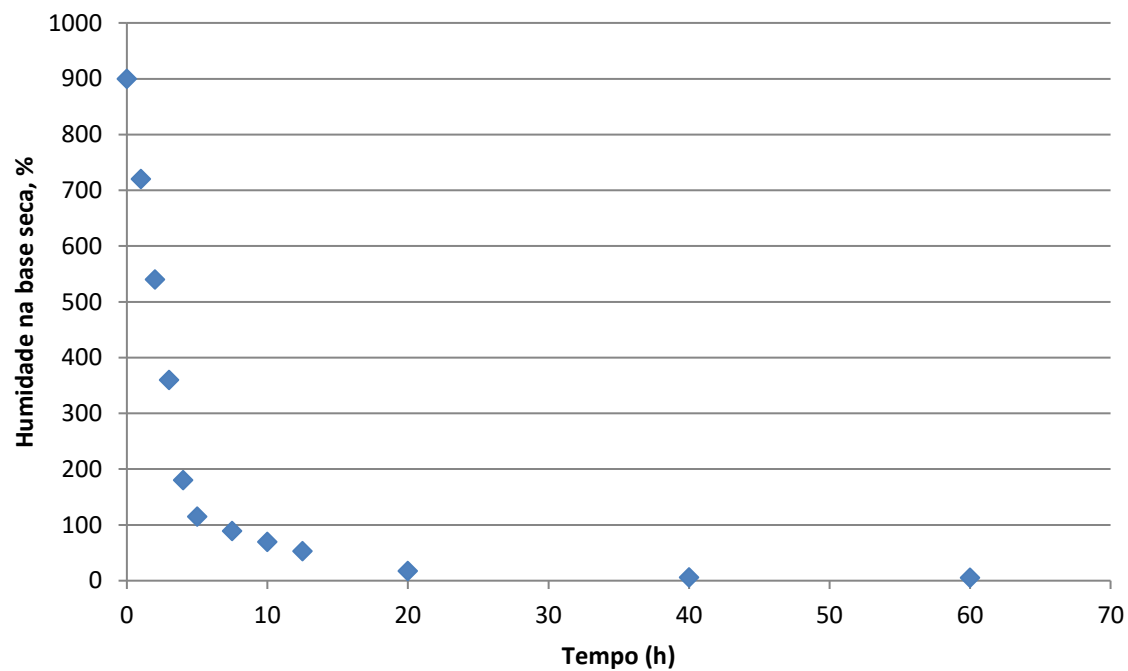


Figura - Curva de secagem

Velocidade de secagem

A velocidade de secagem pode ser calculada a partir da derivada da humidade em base seca em relação ao tempo.

$$R = -\frac{dX}{dt}$$

Numericamente a velocidade de secagem pode ser calculada pela diferença entre as humidades no intervalo considerado.

Por exemplo: para o instante $t = 2$ h, a humidade em base seca é 5,4 kg de água / kg de matéria seca (540%) e para o instante $t = 3$ h, a humidade em base seca é de 3,6 kg de água / kg de matéria seca (360%)

$$R = \frac{dX}{dt} = \frac{X_{n+1} - X_n}{t_{n+1} - t_n} = \frac{3.6 - 5.4}{3 - 2} = -1.8 \quad \text{kg de água/kg de matéria seca} \cdot \text{h}$$

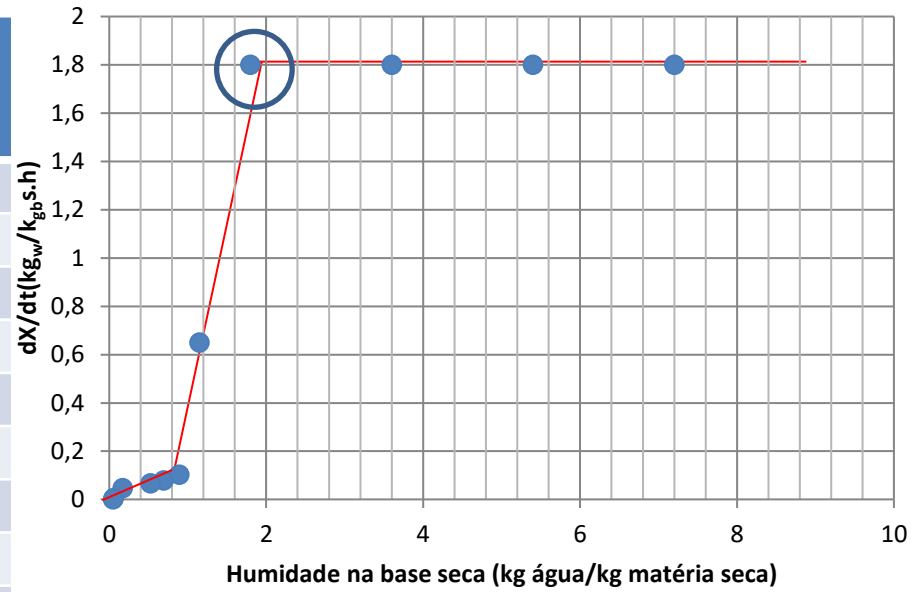
Tempo (h)	Massa (g)	Humidade base seca (%)	Humidade base húmida (%)	velocidade = $\Delta X/\Delta t$ (Kg _w /kg _{ms} ·h)
0	500	900	90	
1	410	720	87.8	1.8
2	320	540	84.4	1.8
3	230	360	78.3	1.8
4	140	180	64.3	1.8
5	107.5	115	53.5	0.65
7.5	94.6	89.3	47.2	0,103
10	84.7	69.4	40.9	0.0792
12.5	76.3	52.6	34.4	0.0672
20	58.6	17.2	14.7	0.0472
40	52.8	5.6	5.2	0.0058
60	52.5	5.0	4.8	0.0003

Observando a Figura da curva de secagem, vemos que até às 4 h, a velocidade de secagem é constante – decorre dos 90%_{b.h.} (900% base seca) até aos 64,3%_{b.h.} (180% base seca)

$$R = \frac{dX}{dt} = \frac{X_{n+1} - X_n}{t_{n+1} - t_n} = \frac{3.6 - 5.4}{3 - 2} = -1.8 \quad (\text{Kg}_w/\text{kg}_{ms} \cdot \text{h})$$

Tempo (h)	Massa (g)	%Humidade base seca (Kg _w /kg _{ms})	Taxa = $\Delta X/\Delta t$ (Kg _w /kg _{ms} ·h)
0	500	900	
1	410	720	1,8
2	320	540	1,8
3	230	360	1,8
4	140	180	1,8
5	107.5	115	0,65
7.5	94.6	89.3	0,103
10	84.7	69.4	0,0792
12.5	76.3	52.6	0,0672
20	58.6	17.2	0,0472
40	52.8	5.6	0,0058
60	52.5	5.0	0,0003

Velocidade de secagem



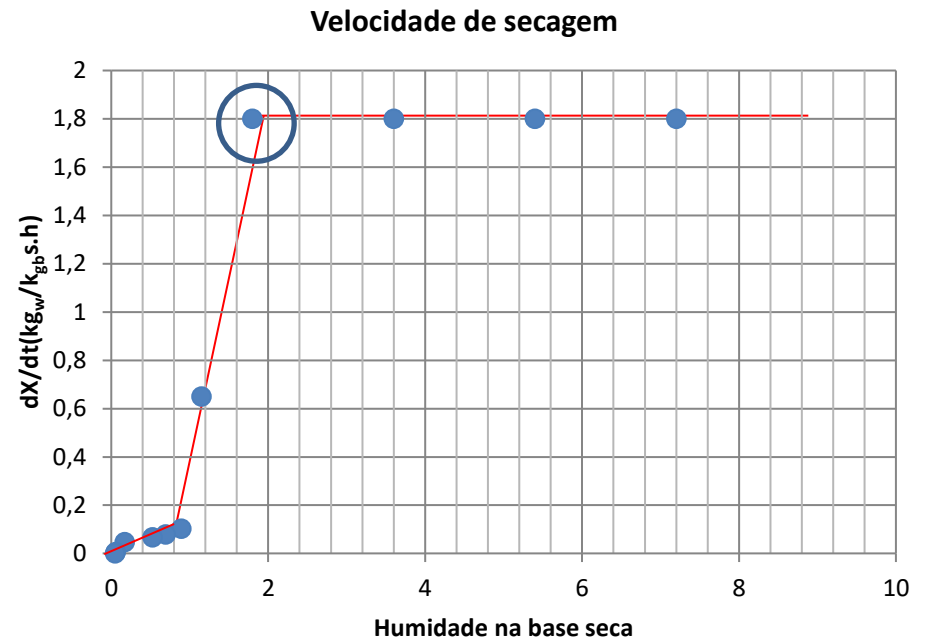
Período de taxa constante

O período de velocidade constante decorre dos 90%_{b.h.} até aos 64.3%_{b.h.}
(Ponto crítico)

Corresponde à faixa dos 9 a 1,8 kg_w/kg_{ms},
nesta faixa foram removidos
 $\Delta X = 9,0 - 1,8 = 7,2 \text{ kg}_w/\text{kg}_{ms}$

a uma taxa de 1,8 kg_w/kg_{ms}.h,

ou seja $1,8 = \Delta X/\Delta t \Rightarrow \Delta t = 7,2/1,8 = 4 \text{ h}$



Período de taxa decrescente

O período de velocidade decrescente decorre a partir de 64,3%_{b.h.} (Ponto crítico)
até aos 14,7 %_{b.h.} (humidade desejada) dos 1,8 até 0,172 kg_w/kg_{ms}

nesta faixa como a velocidade de secagem é variável com o tempo, não podemos simplesmente aplicar o ΔX na equação da velocidade para calcular o tempo.

⇒ Calcular o tempo ponto a ponto baseado em cada taxa.

Determinação do tempo de secagem período de velocidade constante

Humidade do material (X)
(kg H₂O/kg matéria seca)

$$R = - \frac{m_s}{A} \frac{dX}{dt}$$

$$t = \int_{t_1=0}^{t_2=t} dt = - \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{R}$$

$$t = - \frac{m_s}{AR_c} (X_1 - X_2)$$

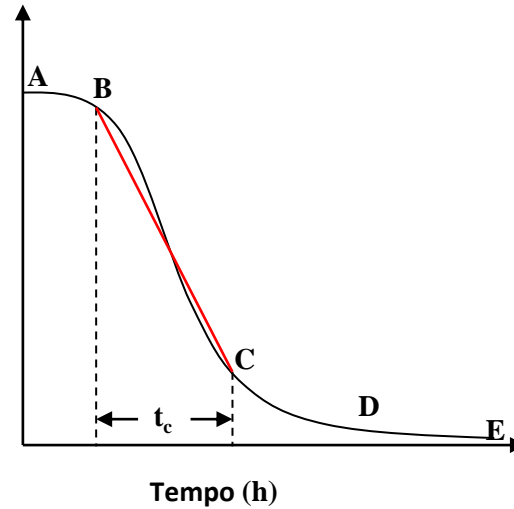
X = humidade do material (kg água/kg matéria seca)

R = velocidade de secagem (kg água/h.m²)

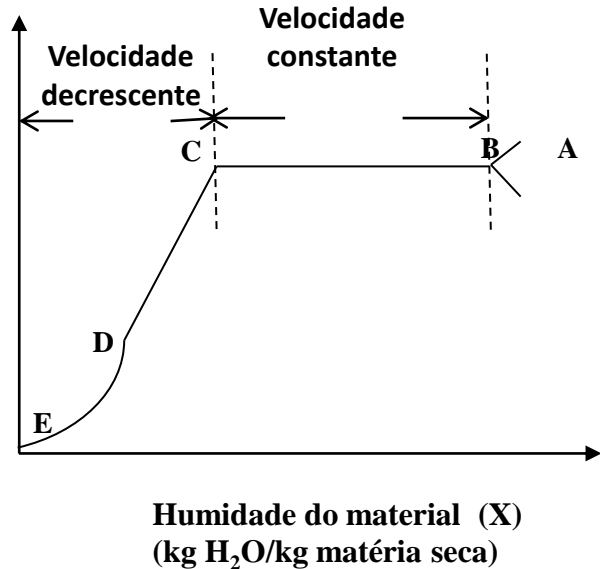
R_c = velocidade de secagem período constante

m_s = kg de matéria seca

A = Área exposta (m²)



Velocidade de secagem (R),
(kg H₂O evaporada/m².h)



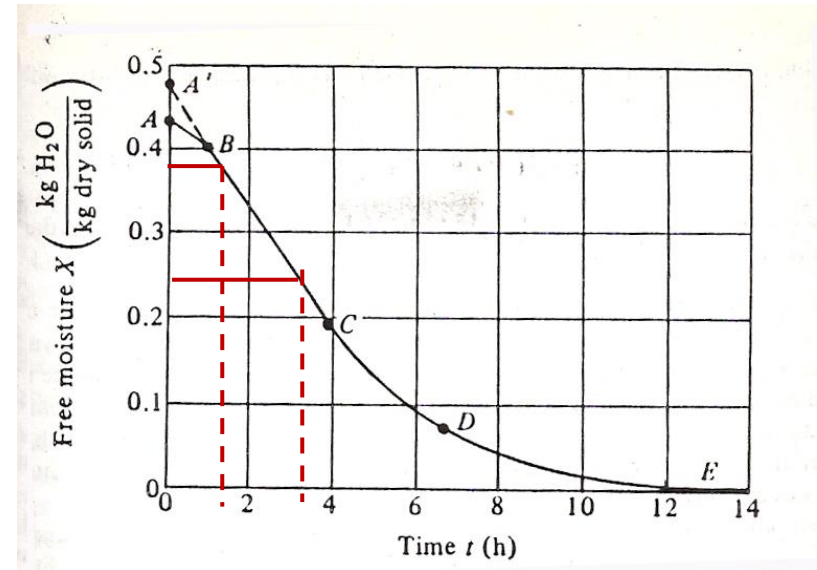
Determinação do tempo de secagem a partir da curva de secagem

Um sólido com 38% de humidade é seco até 25% de humidade (ambos em base seca). Sendo o $m_s = 399$ kg de matéria seca e $A = 18,58$ m²

- Estimar o tempo requerido.

$$t_1 = 1,25 \text{ h}, t_2 = 3,50 \text{ h}$$

$$\text{Tempo de secagem} = 3,50 - 1,25 = 2,25 \text{ h.}$$



Determinação do tempo de secagem a partir da curva da velocidade de secagem

Um sólido com 38% de humidade é seco até 25% de humidade (ambos em base seca). Sendo o $m_s = 399$ kg de matéria seca e $A = 18,58$ m²

Estimar o tempo requerido.

sendo: $m_s / A = 21,5$ kg/m²

Velocidade de secagem = 1,51 kg/h.m²

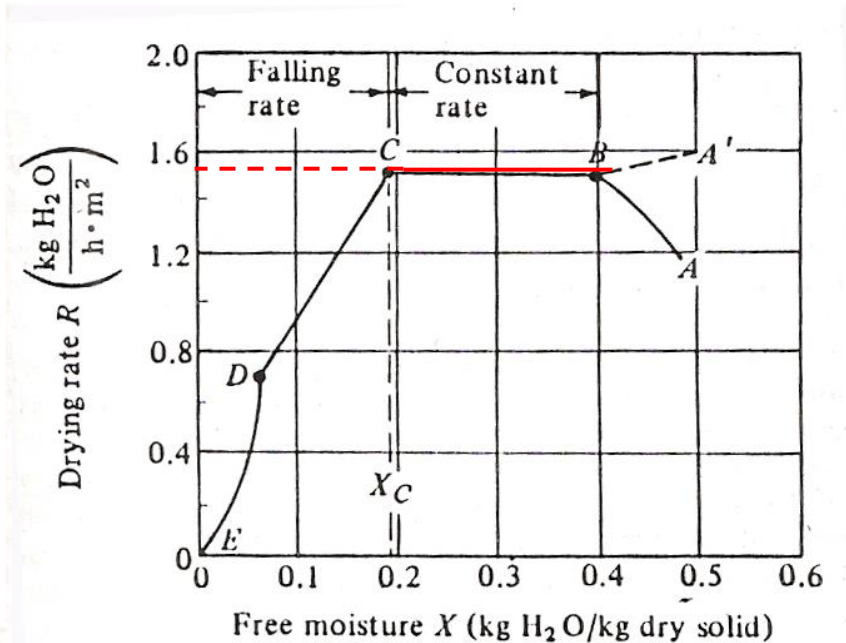
$$t = -\frac{m_s}{AR_c}(X_1 - X_2) = \left(\frac{21,5}{1,51}\right)(0,38 - 0,25) = 1,85h$$

X = humidade do material (kg água/kg matéria seca)

R_c = velocidade de secagem período constante (kg água/h.m²)

m_s = matéria seca (kg)

A = Área exposta (m²)



Cálculo do tempo de secagem para velocidade de secagem decrescente

Velocidade de secagem → for uma função linear

$$R = aX + b$$

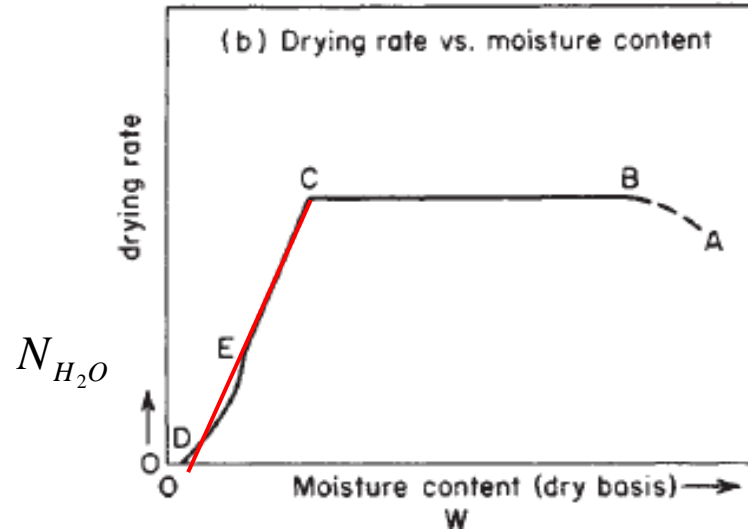
$$t = \frac{m_s}{aA} \int_{R_2}^{R_1} \frac{dR}{R} = \frac{m_s}{aA} \ln \frac{R_1}{R_2}$$

Sendo

$$R_1 = aX_1 + b \quad \text{e} \quad R_2 = aX_2 + b$$

$$a = \frac{R_1 - R_2}{X_1 - X_2}$$

$$t = \frac{m_s (X_1 - X_2)}{A(R_1 - R_2)} \ln \frac{R_1}{R_2}$$



Cálculo do tempo de secagem para velocidade de secagem decrescente

Velocidade de secagem → for uma função linear que passa na origem

$$R = aX$$

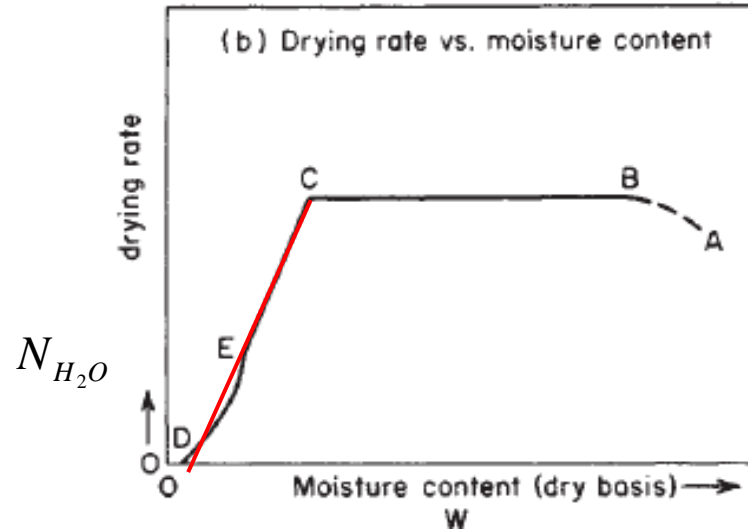
$$t = \frac{m_s}{aA} \int_{R_2}^{R_1} \frac{dR}{R} = \frac{m_s}{aA} \ln \frac{R_1}{R_2}$$

$$t = \frac{m_s X_c}{AR_c} \ln \frac{R_c}{R_2}$$

$$\frac{R_c}{R_2} = \frac{X_c}{X_2}$$

$$t = \frac{m_s X_c}{AR_c} \ln \frac{X_c}{X_2}$$

$$R = R_c \frac{X}{X_c}$$



Cálculo do tempo de secagem para velocidade de secagem decrescente

Um sólido cuja curva de secagem é apresentada na figura é seco dos X_1 38% até $X_2 = 4%$ (base seca)

Sendo $m_s = 399$ kg de matéria seca; e $A = 18,58$ m²

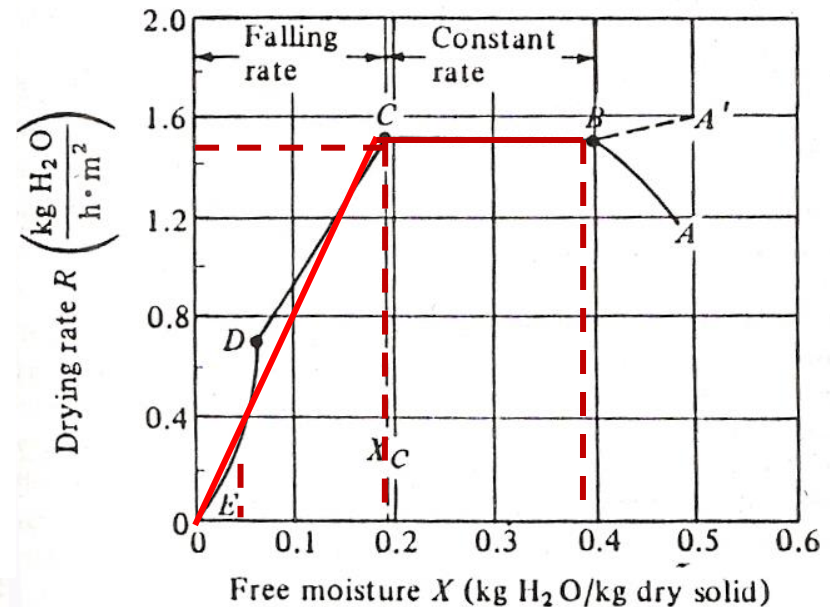
Assumindo que a velocidade de secagem vs humidade é uma linha recta que passa pela origem - do ponto X_c até $X = 0$

Calcule o tempo de secagem.

Para a o periodo de velocidade constante

$X_1 = 0,38$ até $X_c = 0,195$ kg

$R_c = 1.51$ kg água/h. m²



$$t = -\frac{m_s}{AR_c}(X_1 - X_2) = \frac{399}{18,58 \times 1,51}(0,38 - 0,195) = 2,63h$$

Para a o período de velocidade decrescente

$X_1 = 0,195$ kg água/ kg matéria seca até

$X_c = 0,04$ kg água/ kg matéria seca

Sendo $m_s = 399$ kg de matéria seca

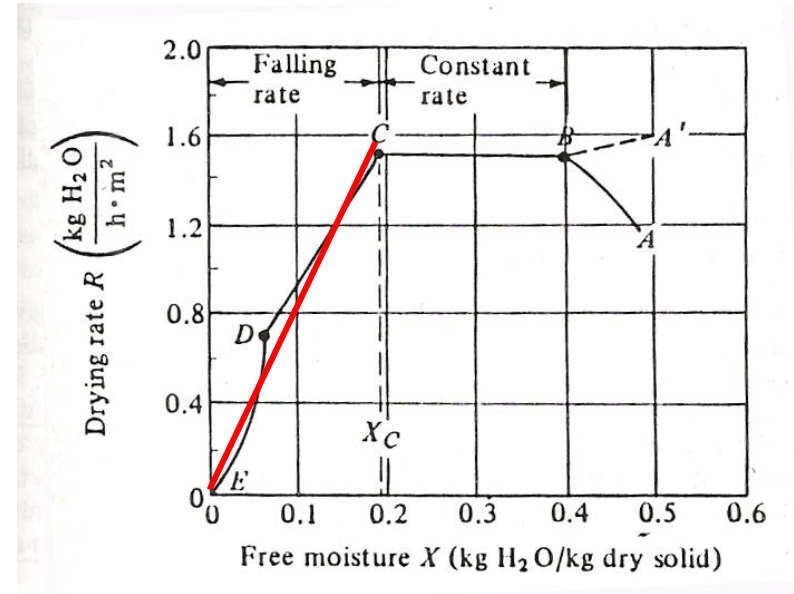
$$A = 18,58 \text{ m}^2$$

$R_c = 1,51$ kg água /h.m² e $X_c = 0,109$

Secagem desde X_c até $X_2 = 0,040$ kg água / kg matéria seca

$$t = \frac{m_s X_c}{AR_c} \ln \frac{X_c}{X_2} = \frac{399 \times 0,195}{18,58 \times 1,51} \ln \frac{0,195}{0,040} = 4,39h$$

Tempo total = 2,63 + 4,3 = 6,93 h



Cálculo do tempo de secagem para velocidade de secagem decrescente

Método de integração gráfica

Um sólido cuja curva de secagem é apresentada na figura é seco dos X_1 38% até $X_2 = 4%$ (base seca)

Sendo $m_s = 399$ kg de matéria seca

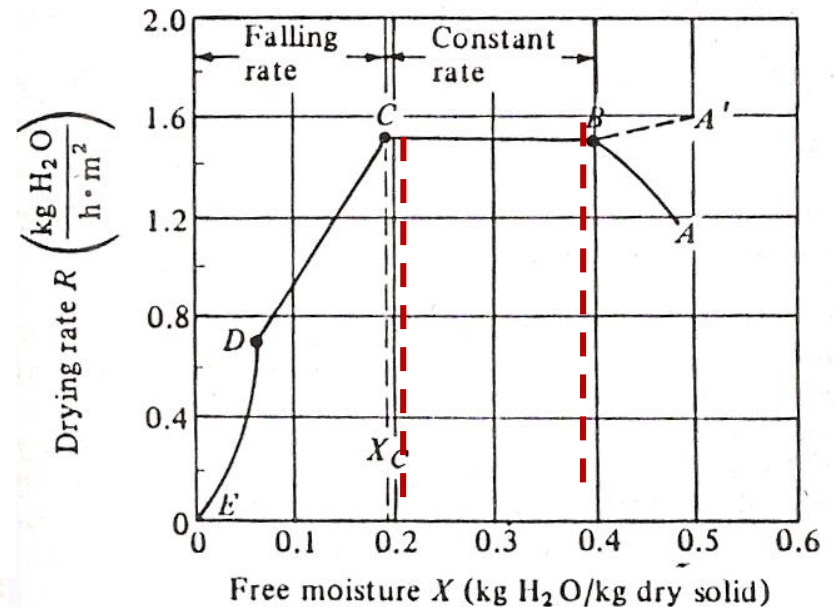
$$A = 18,58 \text{ m}^2$$

Calcule o tempo de secagem.

Para a o periodo de velocidade constante

$X_1 = 0,38$ até $X_c = 0,195$ kg

$R_c = 1.51$ kg água/h. m^2



$$t = -\frac{m_s}{AR_c} (X_1 - X_2) = \frac{399}{18,58 \times 1,51} (0,38 - 0,195) = 2,63h$$

Cálculo do tempo de secagem para velocidade de secagem decrescente

Método de integração gráfica

Para a o periodo de velocidade decrescente

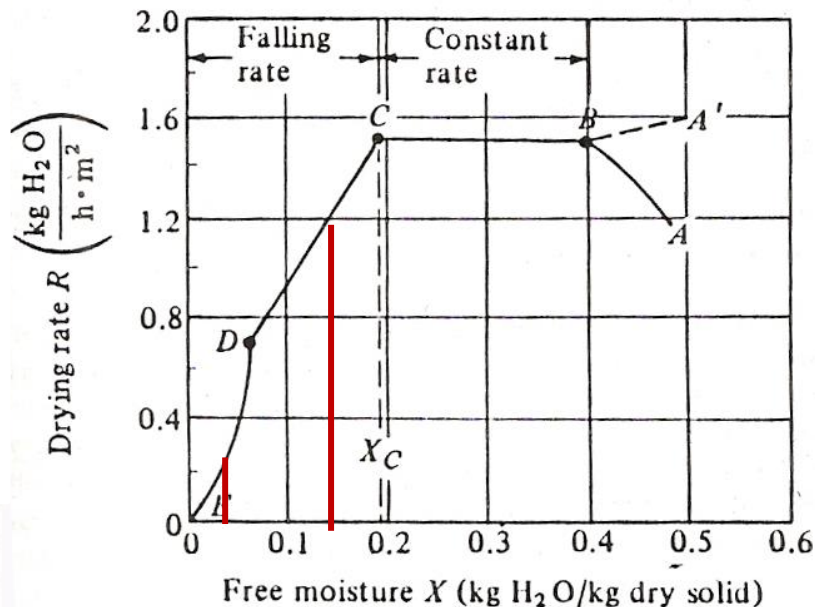
$X_1 = 0,195$ kg água/ kg matéria seca até

$X_c = 0,04$ kg água/ kg matéria seca

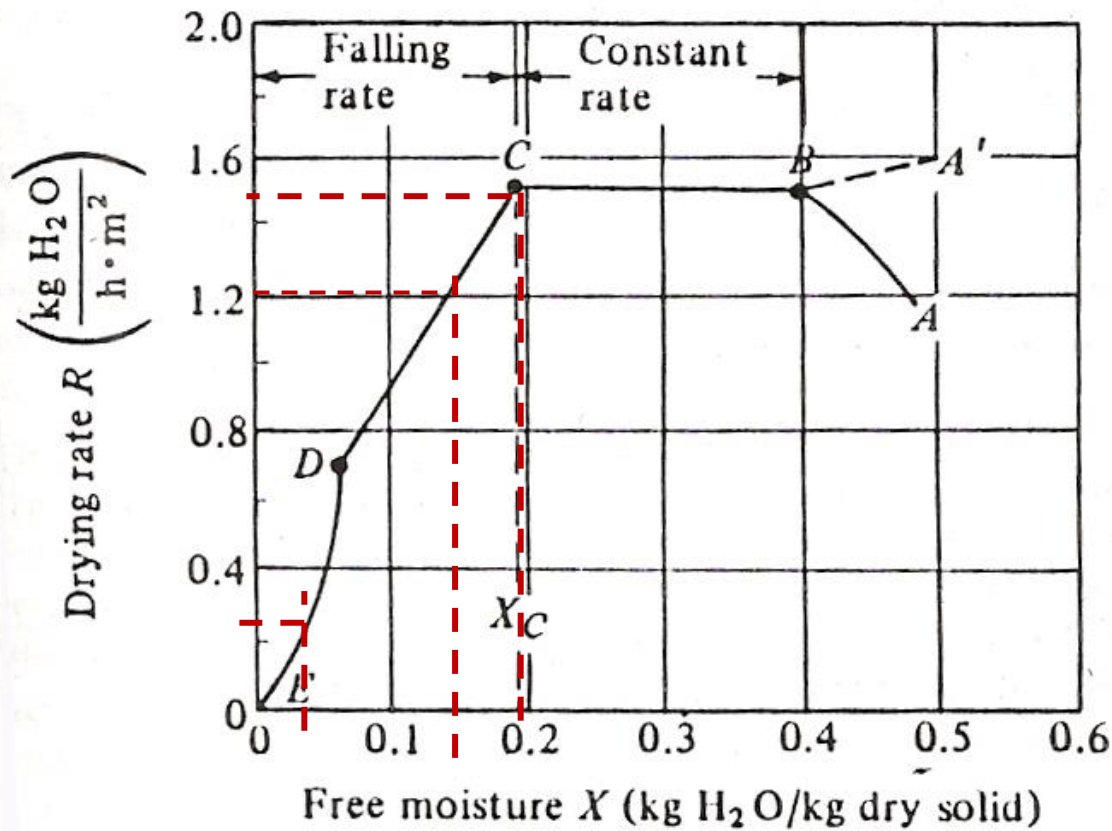
Sendo $m_s = 399$ kg de matéria seca

$$A = 18,58 \text{ m}^2$$

Ler os valores de **R** para vários valores de
humidade **X**

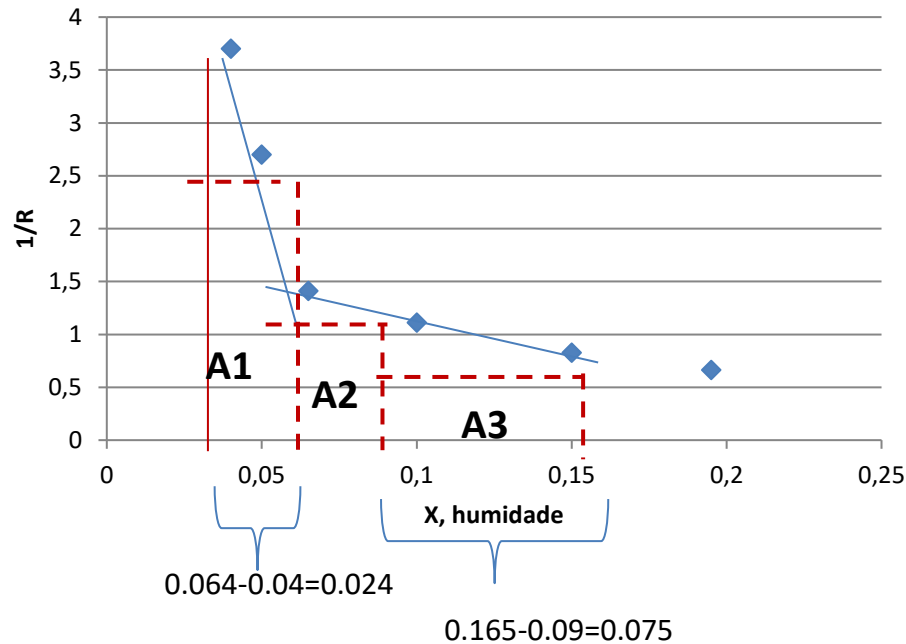


X	R	1/R	X	R	1/R
0,195	1,51	0,663	0,065	0,71	1,41
0,150	1,21	0,826	0,05	0,37	2,70
0,100	0,90	1,11	0,04	0,27	3,70



X	R	$1/R$	X	R	$1/R$
0,195	1,51	0,663	0,065	0,71	1,41
0,150	1,21	0,826	0,05	0,37	2,70
0,100	0,90	1,11	0,04	0,27	3,70

Representar 1/R em função de X



X	R	1/R
0,195	1,51	0,663
0,150	1,21	0,826
0,100	0,90	1,11
0,065	0,71	1,41
0,05	0,37	2,70
0,04	0,27	3,70

Representar 1/R em função de X e calcular a áreas de $X_1 = 0,105$ até $X_c = 0,04$

$$\text{Area} = A_1 + A_2 + A_3 = (2,5 \times 0,024) + (1,18 \times 0,056) + (0,84 \times 0,075) = 0,189$$

$$\text{Substituindo na equação: } t = \frac{m_s}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{R} = \left(\frac{399}{18,58} \right) (0,189) = 4,06h$$

$$\text{Tempo total} = 2,63 + 4,06 = 6,69 h$$