

GUÍA 9 - Secado

Problema 1

1° Cuatrimestre - 2025

Enunciado

Una torta filtrante de 0,02 m de espesor, que contiene inicialmente 1000 kg de sólido seco por m^3 , se seca sobre una bandeja por un solo lado en condiciones de secado constante.

La velocidad máxima de secado es de $1 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{h m}^2$. Para secar la torta desde la humedad del 40% hasta la de 5% (base seca) se necesitan 12 horas y puede suponerse que en el periodo postcrítico la velocidad de secado es proporcional a la humedad libre y que la humedad de equilibrio es despreciable.

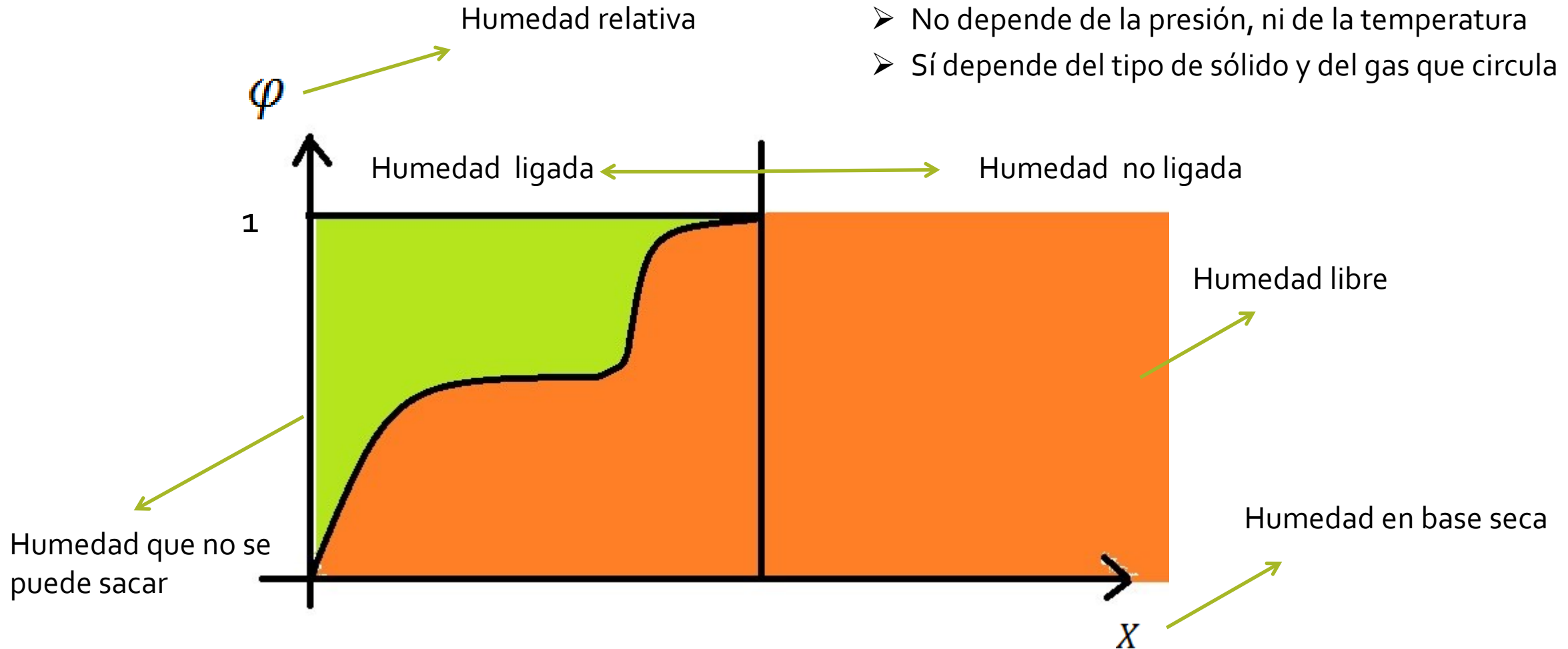
Calcular:

- a. Humedad Crítica
- b. Los períodos precrítico y postcrítico
- c. En cuánto debe incrementarse el tiempo de secado para que la humedad se reduzca al 3%.

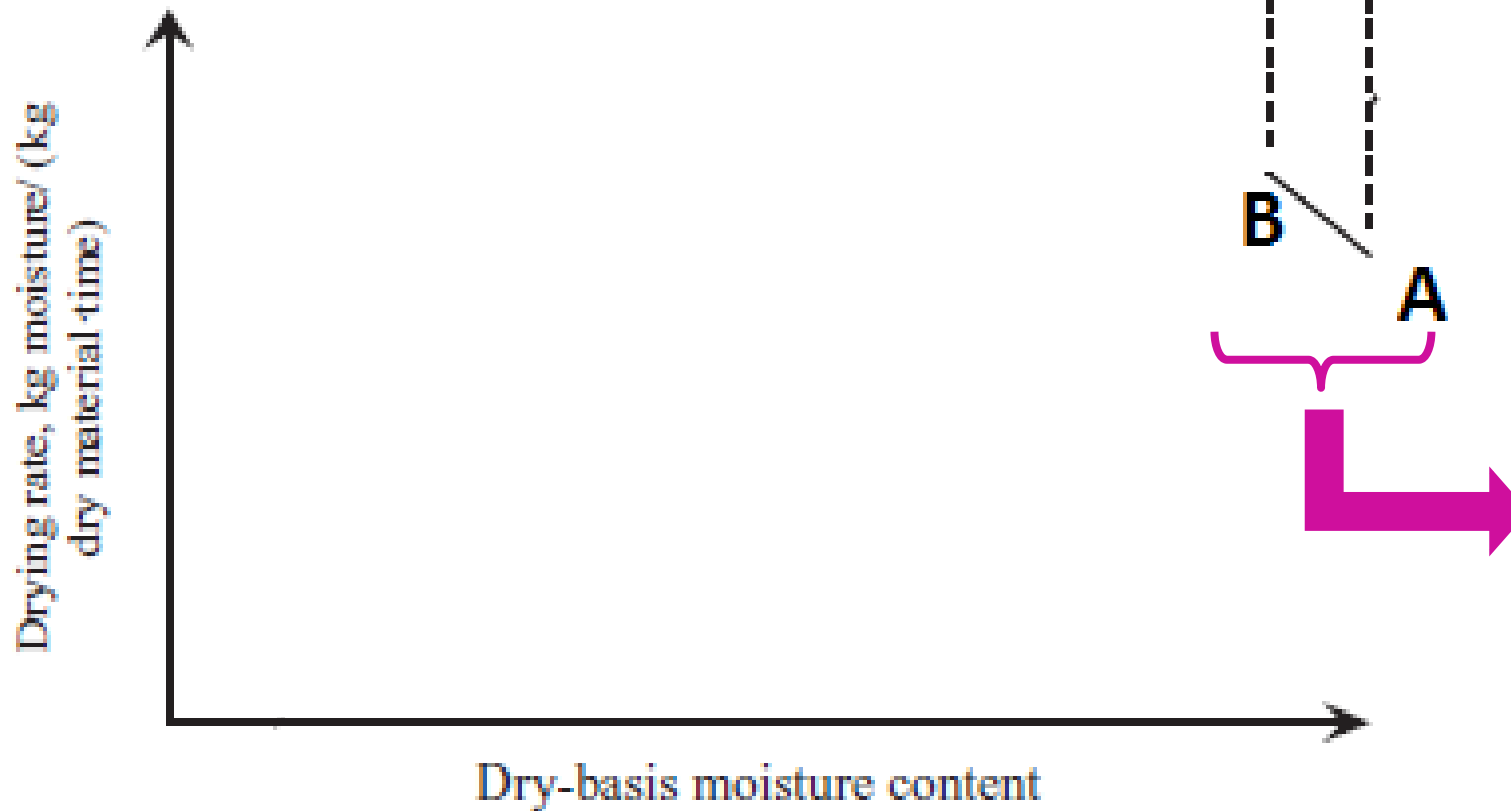
Repaso Teórico

¿De qué depende la curva?

- No depende de la presión, ni de la temperatura
- Sí depende del tipo de sólido y del gas que circula



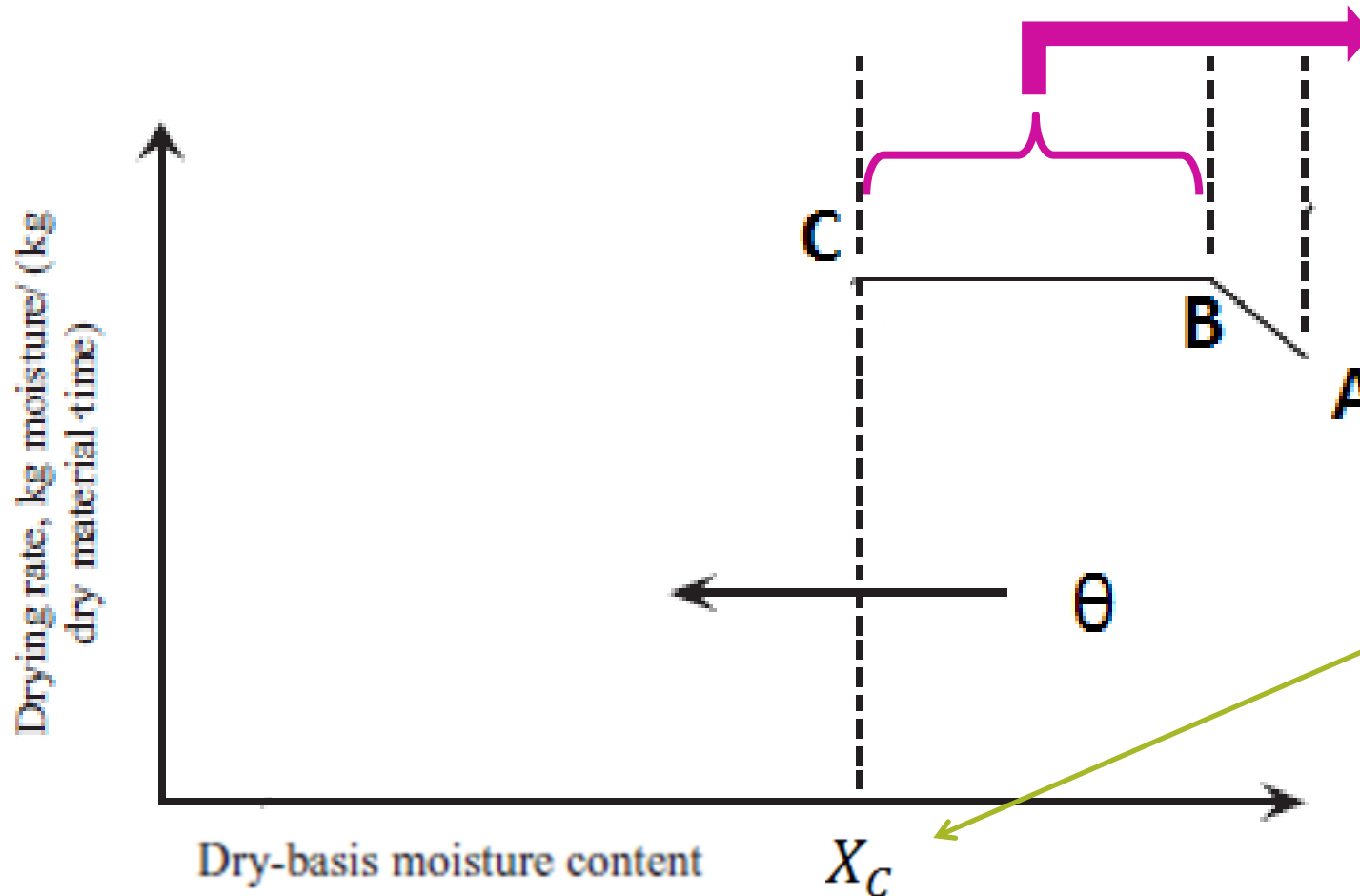
Periodos de Secado - AB



AB: Período no estacionario en donde la temperatura del sólido no es homogénea.

- Se empieza a calentar desde la superficie hacia el centro
- **Se desestima esta etapa**

Periodos de Secado – BC



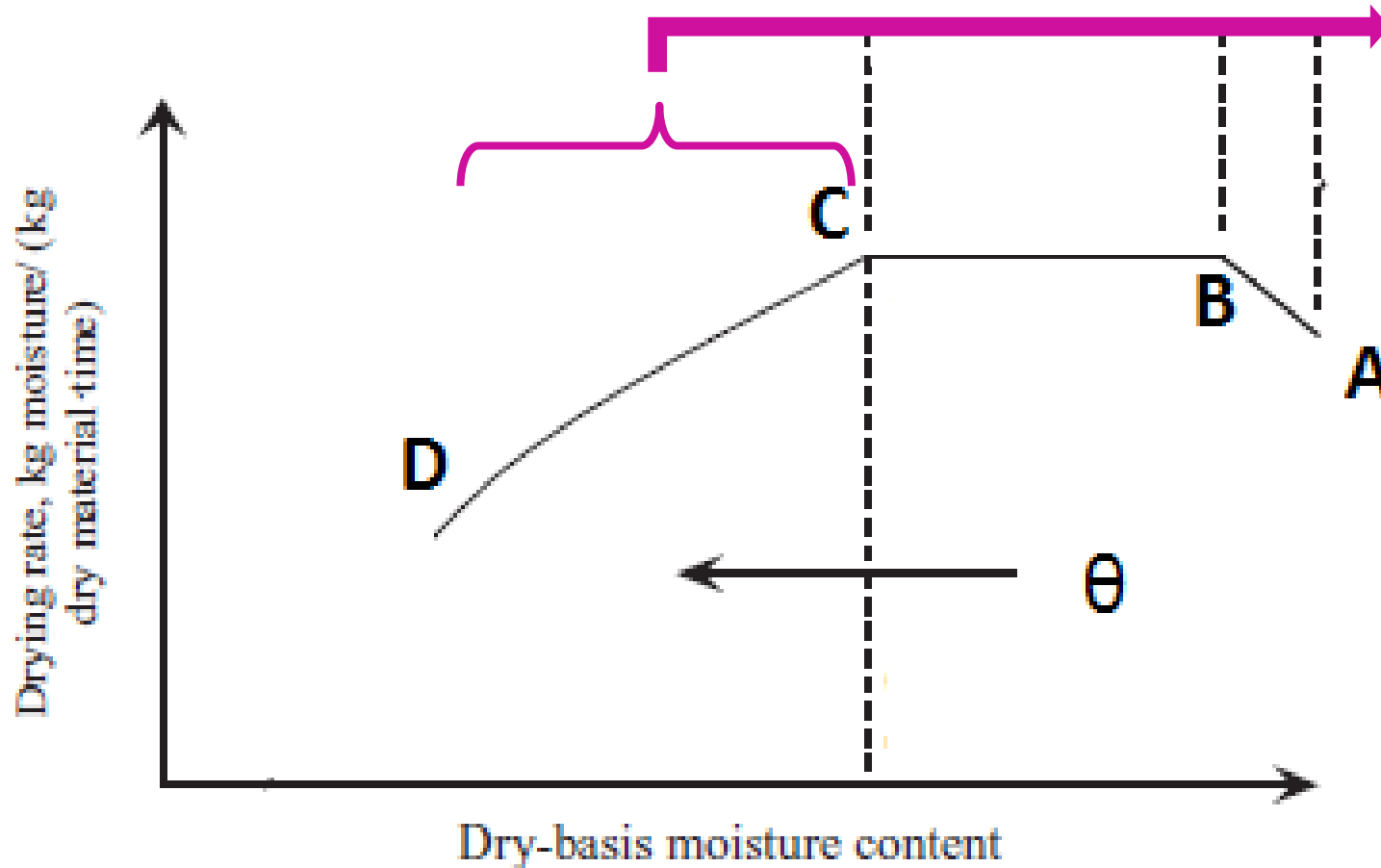
BC: Período de velocidad máxima de secado o “tiempo de secado precrítico”.

- Se elimina la humedad no ligada
- Hay evaporación en la superficie
- Finaliza en la **humedad crítica**

¿La superficie empapada/embebida a que temperatura se encuentra?

T_{bh}

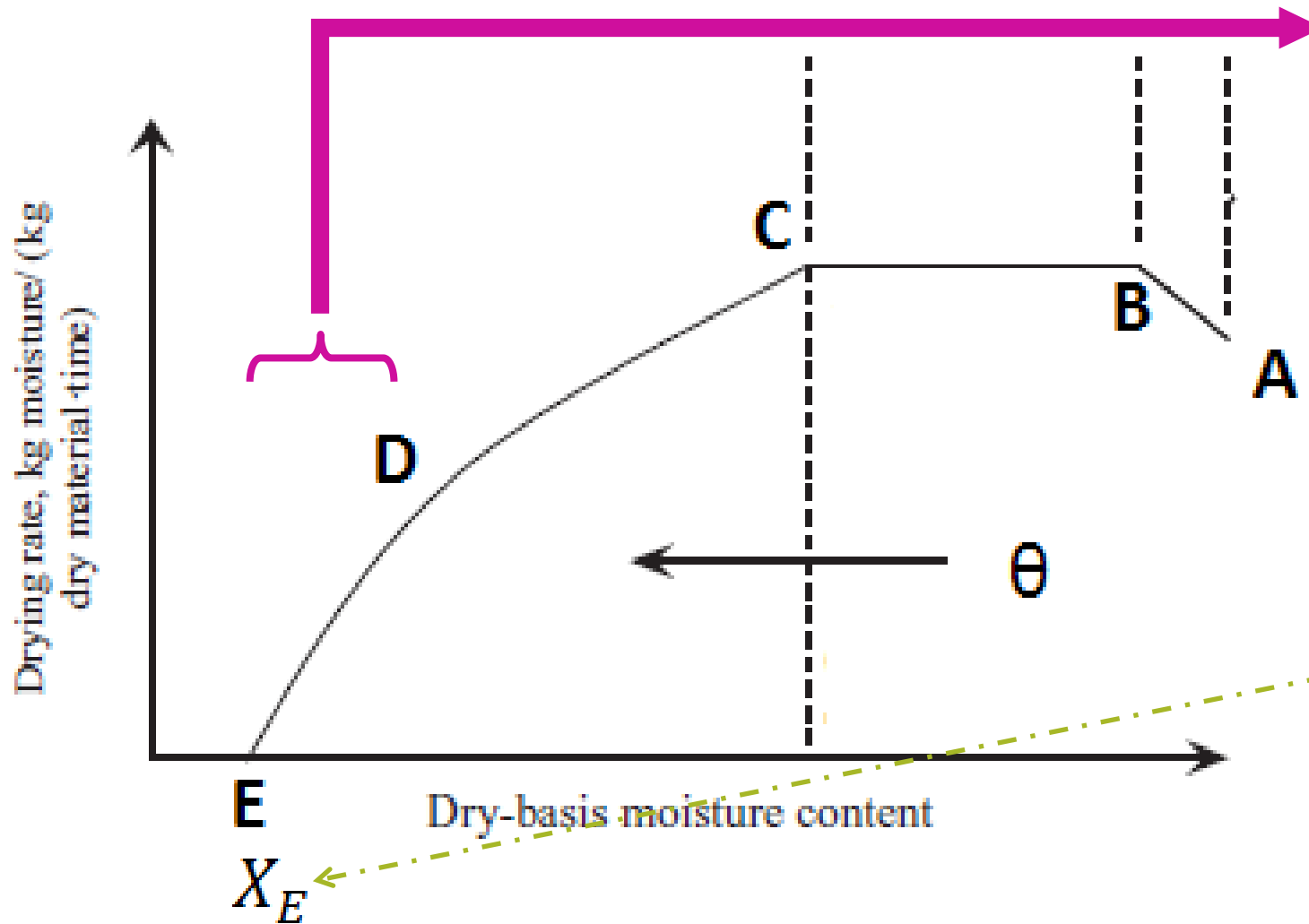
Periodos de Secado – CD



CD: Período de secado “post crítico”.

- El líquido difunde y se evapora por el gradiente de concentración y temperatura que existe del centro hasta la superficie
- Se puede considerar una velocidad de secado lineal con respecto a la humedad en base seca

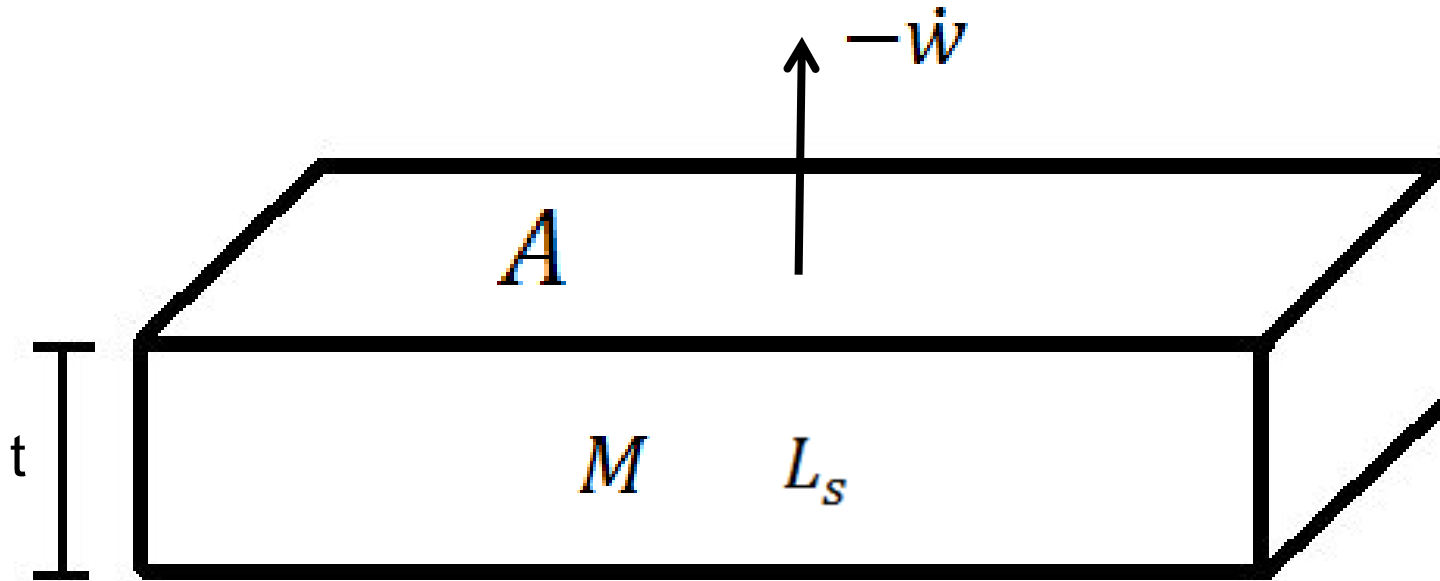
Periodos de Secado – DE



DE: Etapa con evaporación en el interior del sólido.

- Este mecanismo no siempre existe
- Se elimina humedad ligada
- Generalmente existen efectos de capilaridad
- Finaliza cuando la humedad es tal que el líquido en el interior del sólido se encuentra en equilibrio con la humedad del aire a esa temperatura

Esquema y definiciones



$-\dot{w}$: caudal de agua evaporada

M : masa sólido

L_s : masa sólido seco

t : espesor del sólido

$$\frac{L_s}{A} = \frac{V_s \cdot \rho_s}{A} = \frac{A \cdot t \cdot \rho_s}{A} = t \cdot \rho_s$$

$$t \cdot \rho_s = 0,02 \text{ m} \cdot 1000 \frac{\text{kg}_s}{\text{m}_s^3}$$

$$\text{Humedad Base seca: } X = \frac{\text{kg agua}}{\text{kg sólido seco}}$$

$$\text{Humedad Base húmeda: } x = \frac{\text{kg agua}}{\text{kg sólido húmedo}}$$

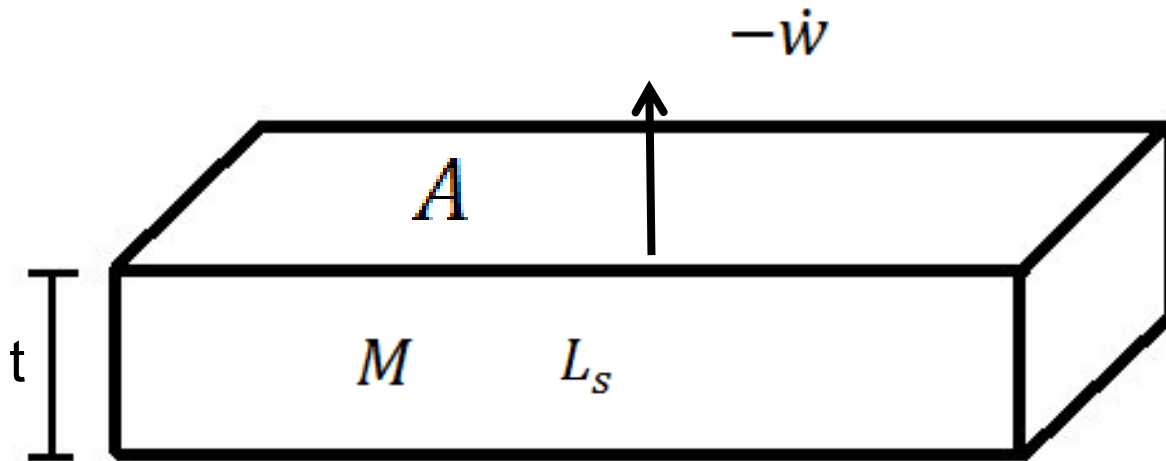


$$x = \frac{X}{1 + X}$$

Ecuación de Diseño

Planteando un balance de masa: $\frac{dM}{d\theta} = -\dot{w}$

Planteando un balance parcial para el agua: $-A \cdot N = \frac{d(L_s \cdot X)}{d\theta} \xrightarrow{L_s \text{ cte}} = L_s \cdot \frac{dX}{d\theta}$ N : velocidad de secado
[masa/(tiempo . área)]



$$d\theta = -\frac{L_s}{A} \frac{dX}{N}$$

Resolución – Ítem a

Suposiciones:

- La humedad de equilibrio es desestimable $\longrightarrow$ Se puede asumir que: $X_E \approx 0$
- No sabemos si la humedad inicial y final se encuentran en el período de región precrítica o postcrítica.
 $\longrightarrow$ Asumimos una región, y evaluamos la validez de los resultados

Se presentan tres alternativas para analizar:

- Hipótesis 1: $X_c < X_f \longrightarrow$ 100% pre-crítico
- Hipótesis 2: $X_f < X_c < X_0 \longrightarrow$ Zona pre-crítica y post crítica
- Hipótesis 3: $X_f, X_0 < X_c \longrightarrow$ 100% post crítico

Datos:

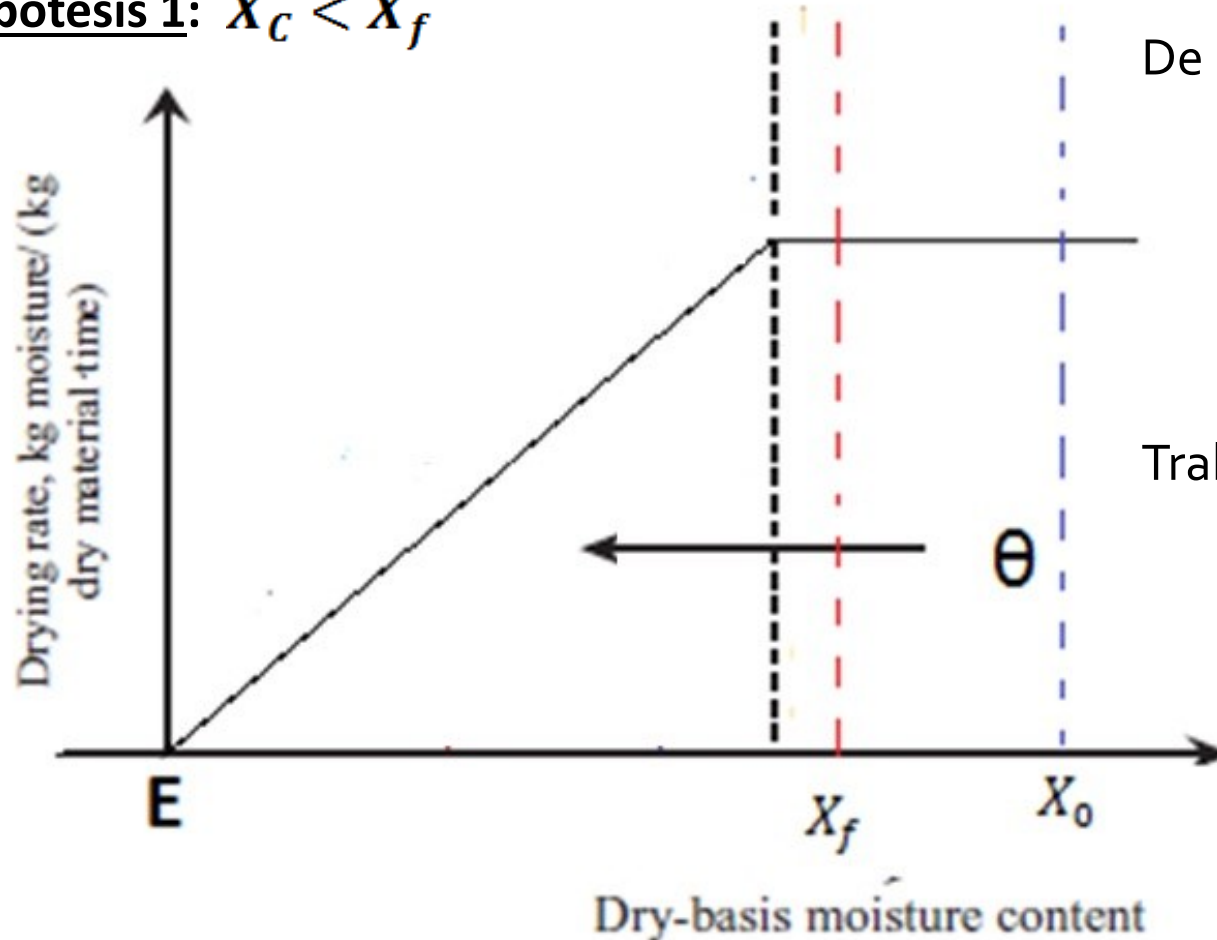
$$\theta_f - \theta_0 = 12 \text{ h}$$

$$X_0 = 0,4 \frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{kg}_s}$$

$$X_f = 0,05 \frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{kg}_s}$$

Resolución – Ítem a

Hipótesis 1: $X_c < X_f$



De la ecuación de diseño:

$$\int_{\theta_0}^{\theta_f} d\theta = \theta_f - \theta_0 = -\frac{L_s}{A} \int_{X_0}^{X_f} \frac{dX}{N}$$

$$\frac{L_s}{A} = \frac{V_s \cdot \rho_s}{A} = \frac{A \cdot t \cdot \rho_s}{A} = t \cdot \rho_s$$

Trabajando a la velocidad de secado crítica ($N = \text{cte}$):

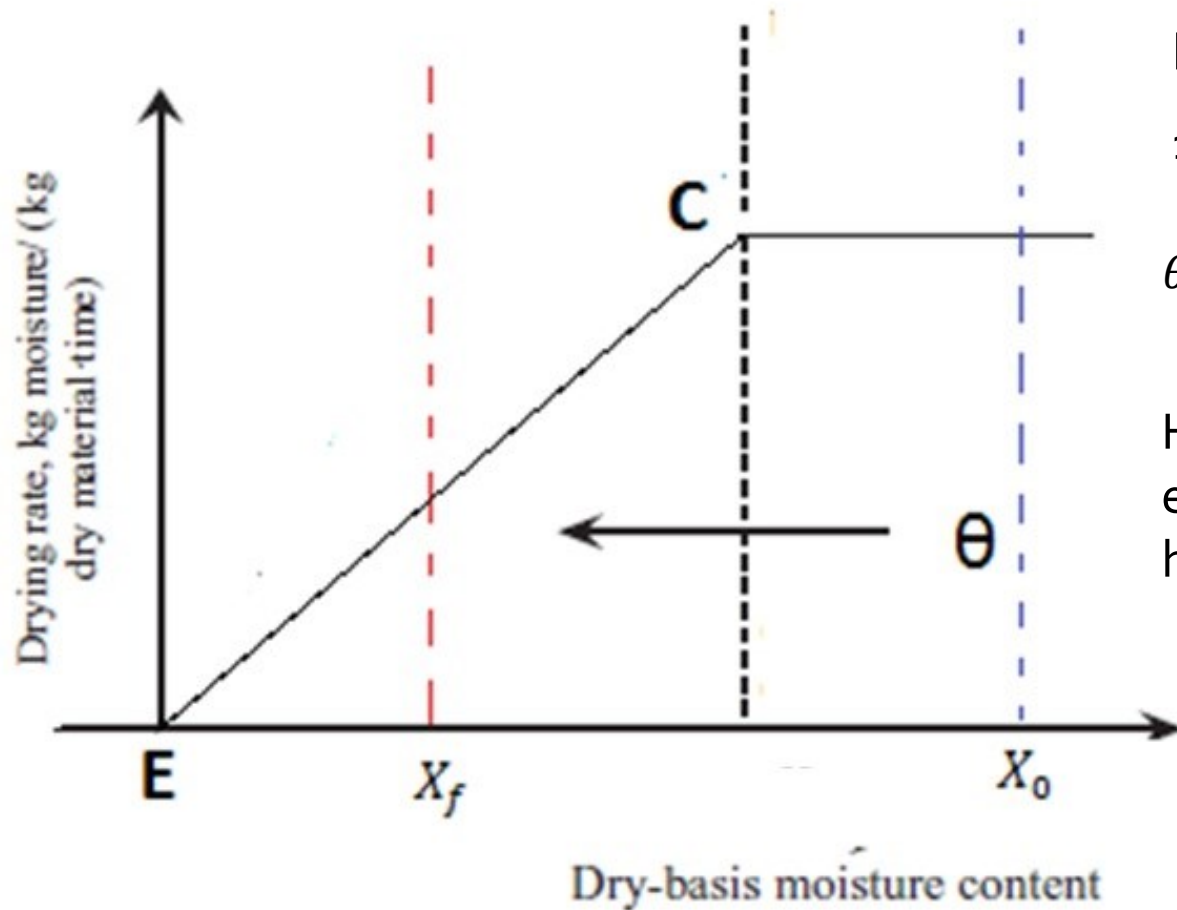
$$\theta_f - \theta_0 = -\frac{t \cdot \rho_s}{N_c} \cdot \int_{X_0}^{X_f} dX = \frac{t \cdot \rho_s}{N_c} \cdot (X_0 - X_f)$$

$$\frac{t \cdot \rho_s}{N_c} \cdot (X_0 - X_f) = 7h$$

HIPÓTEISIS INCORRECTA

Resolución – Ítem a

Hipótesis 2: $X_f < X_c < X_0$



En este caso, tenemos parte del secado en la zona pre-crítica y parte en la zona post crítica:

1. Para la zona precrítica:

$$\theta_{int} - \theta_0 \stackrel{\text{def}}{=} \theta_{prec} = -\frac{t \cdot \rho_s}{N_c} \cdot \int_{X_0}^{X_c} dX = \frac{t \cdot \rho_s}{N_c} \cdot (X_0 - X_c)$$

Hacemos lo mismo que en la hipótesis 1, cambiando el límite superior de integración; ya no es la humedad final, sino la crítica.

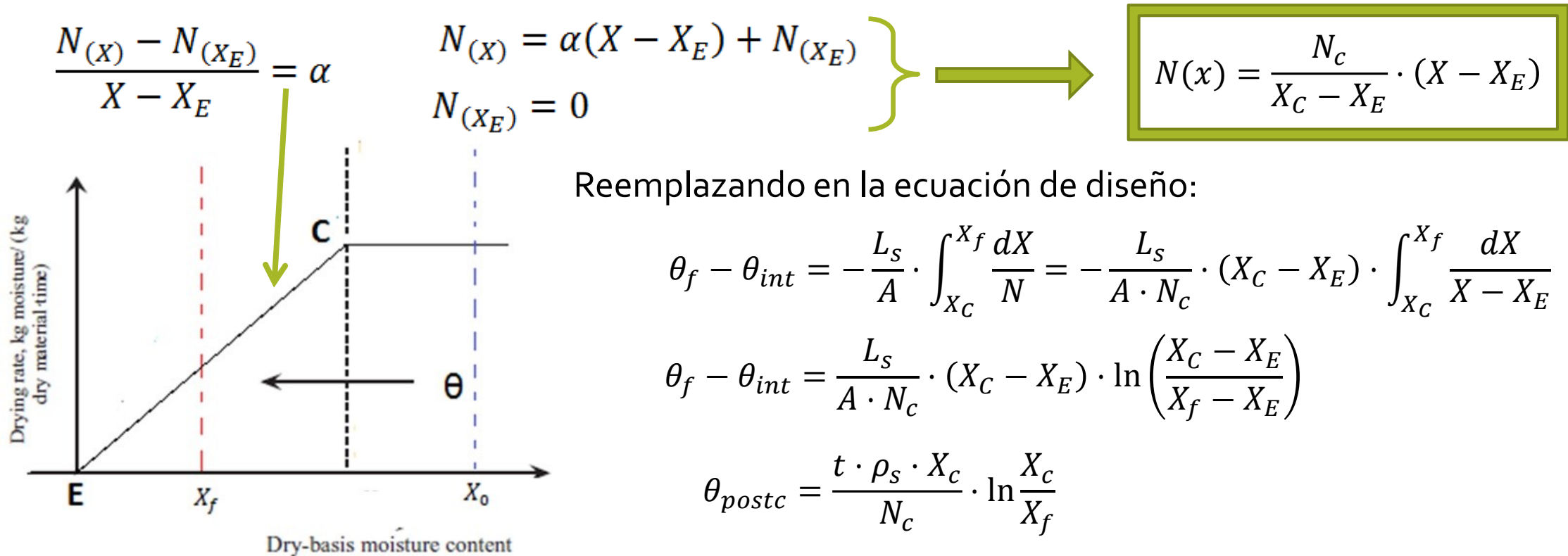
?

Resolución – Ítem a

Hipótesis 2: $X_f < X_c < X_0$

2. Para la zona post crítica: $\theta_f - \theta_{int} = -\frac{L_s}{A} \cdot \int_{X_c}^{X_f} \frac{dX}{N}$

La velocidad de secado N ya no es constante, tiene una funcionalidad lineal con la humedad:



Resolución – Ítem a

Hipótesis 2: $X_f < X_c < X_0$

Para el tiempo total de la operación: $\theta_f - \theta_0 = 12 \text{ h}$

$$\theta_{prec} + \theta_{postc} = \theta_{int} - \theta_0 + \theta_f - \theta_{int} = \theta_f - \theta_0$$

$$12 \text{ hs} = \frac{t \cdot \rho_s}{N_c} \cdot (X_0 - X_c) + \frac{t \cdot \rho_s \cdot X_c}{N_c} \cdot \ln \frac{X_c}{X_f}$$

Conocemos todo, excepto la humedad crítica:

$$X_c = 0,279$$

Este valor se encuentra en el intervalo $X_f < X_c < X_0$

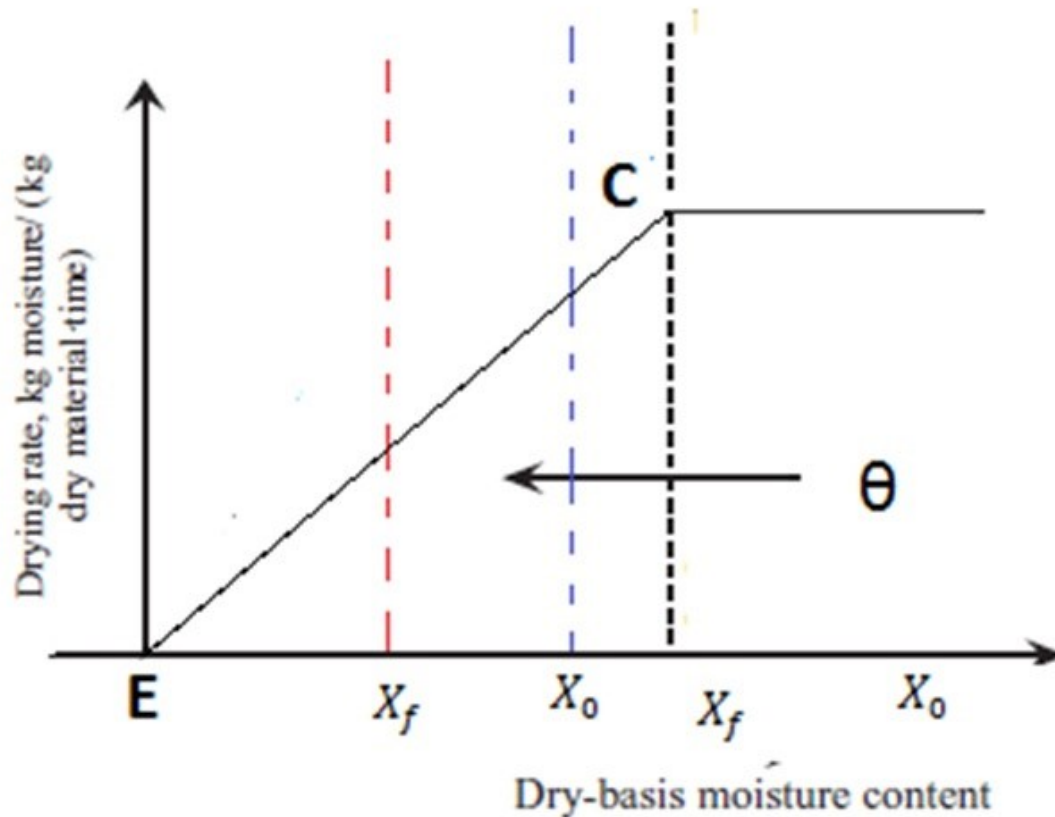


HIPÓTESIS
ACEPTABLE

Resolución – Ítem a

Hipótesis 3: $X_f, X_0 < X_c$

Trabajando exclusivamente en la zona postcrítica, con dependencia lineal entre la velocidad de secado y la humedad, se toma la misma expresión de la hipótesis 2 con los límites de integración adecuados:



$$\theta_f - \theta_0 = \frac{L_s}{AN_c} (X_c - X_E) \int_{X_f}^{X_0} \frac{dX}{X - X_E}$$

$$12 \text{ h} = \frac{t \rho_s X_c}{N_c} \ln \left(\frac{X_0}{X_f} \right)$$

Despejando:

$$X_c = 0,289$$

¿ $X_f, X_0 < X_c$?

**HIPÓTESIS
INCORRECTA**

Resolución – Ítem b

Calcular los períodos pre crítico y post crítico

Sabemos que el secado se da según la Hipótesis 2 (periodo pre-crítico y post-critico).

Conocemos la humedad crítica ($X_c = 0,279$), así que solo queda reemplazar en las expresiones:

$$\theta_{prec} = \frac{t \cdot \rho_s}{N_c} \cdot (X_0 - X_c) = \frac{0,02 \text{ m} \cdot 1000 \frac{kg_s}{m^3}}{1 \frac{kg_{agua}}{h \cdot m^2}} \cdot \left(0,4 \frac{kg_{agua}}{kg_s} - 0,279 \frac{kg_{agua}}{kg_s} \right) = \mathbf{2,43 \text{ hs}}$$

$$\theta_{postc} = \frac{t \cdot \rho_s \cdot X_c}{N_c} \cdot \ln \frac{X_c}{X_f} = \frac{0,02 \text{ m} \cdot 1000 \frac{kg_s}{m^3} \cdot 0,279 \frac{kg_{agua}}{kg_s}}{1 \frac{kg_{agua}}{h \cdot m^2}} \cdot \ln \frac{0,279 \frac{kg_{agua}}{kg_s}}{0,05 \frac{kg_{agua}}{kg_s}} = \mathbf{9,57 \text{ hs}}$$

Resolución – Ítem c

Calcular en cuánto debe incrementarse el tiempo de secado para que la humedad se reduzca al 3%.

Si quiero disminuir la humedad final, lógicamente debemos aumentar el tiempo de secado.

La nueva humedad final será de : $X'_f = 0,03 \frac{kg_{agua}}{kg_s}$

$$\theta_f - \theta_0 = \frac{t \cdot \rho_s}{N_c} \cdot \left[(X_0 - X_c) + X_c \cdot \ln \frac{X_c}{X'_f} \right] = 2,43 \text{ hs} + 12,42 \text{ hs} = \mathbf{14,85 \text{ hs}}$$

$$\theta_f - \theta_0 = 14,85 \text{ h}$$

OBS: El tiempo de secado precrítico no se ve afectado por la disminución de la humedad final en el periodo postcrítico.



¿PREGUNTAS?