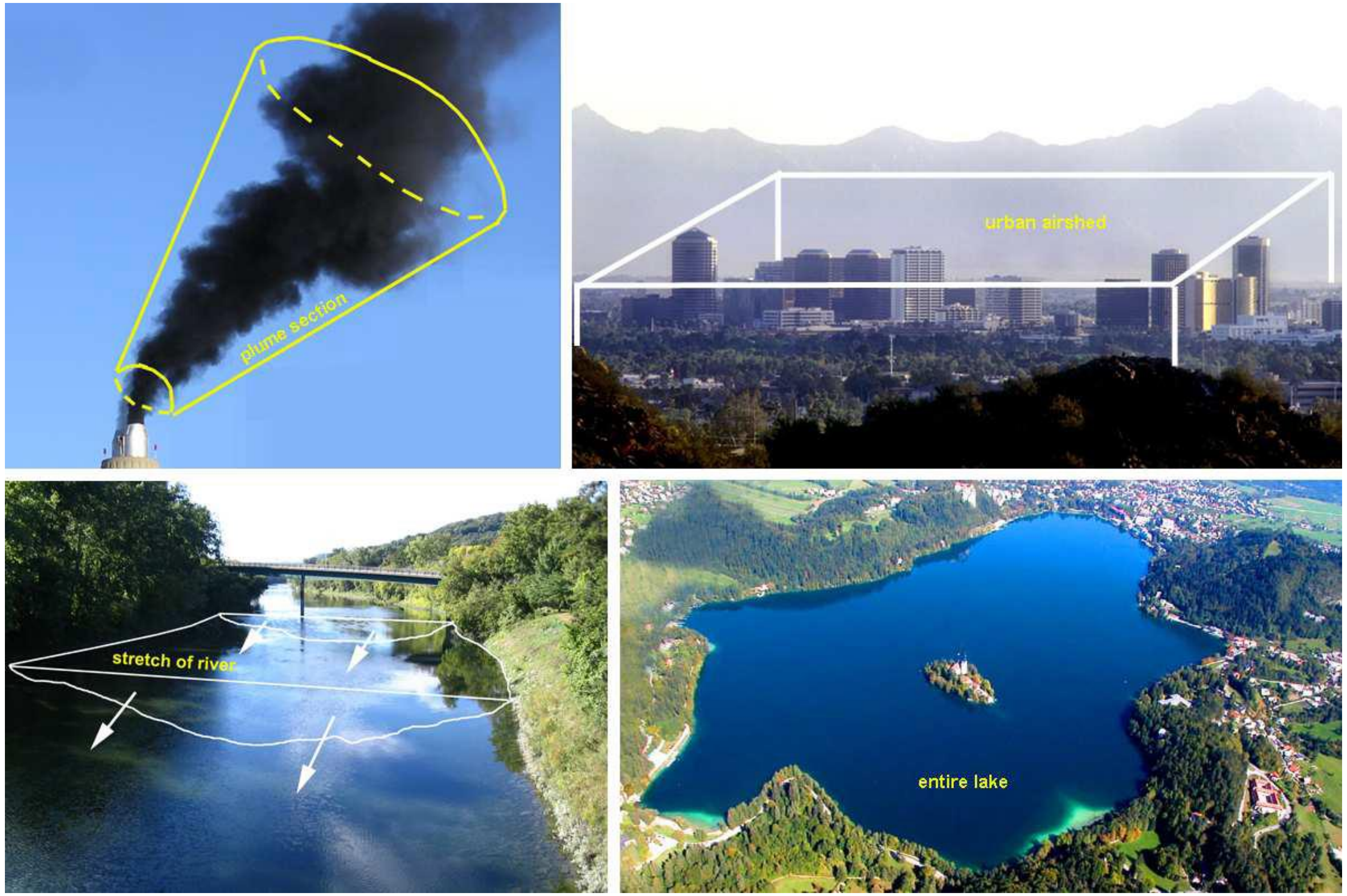
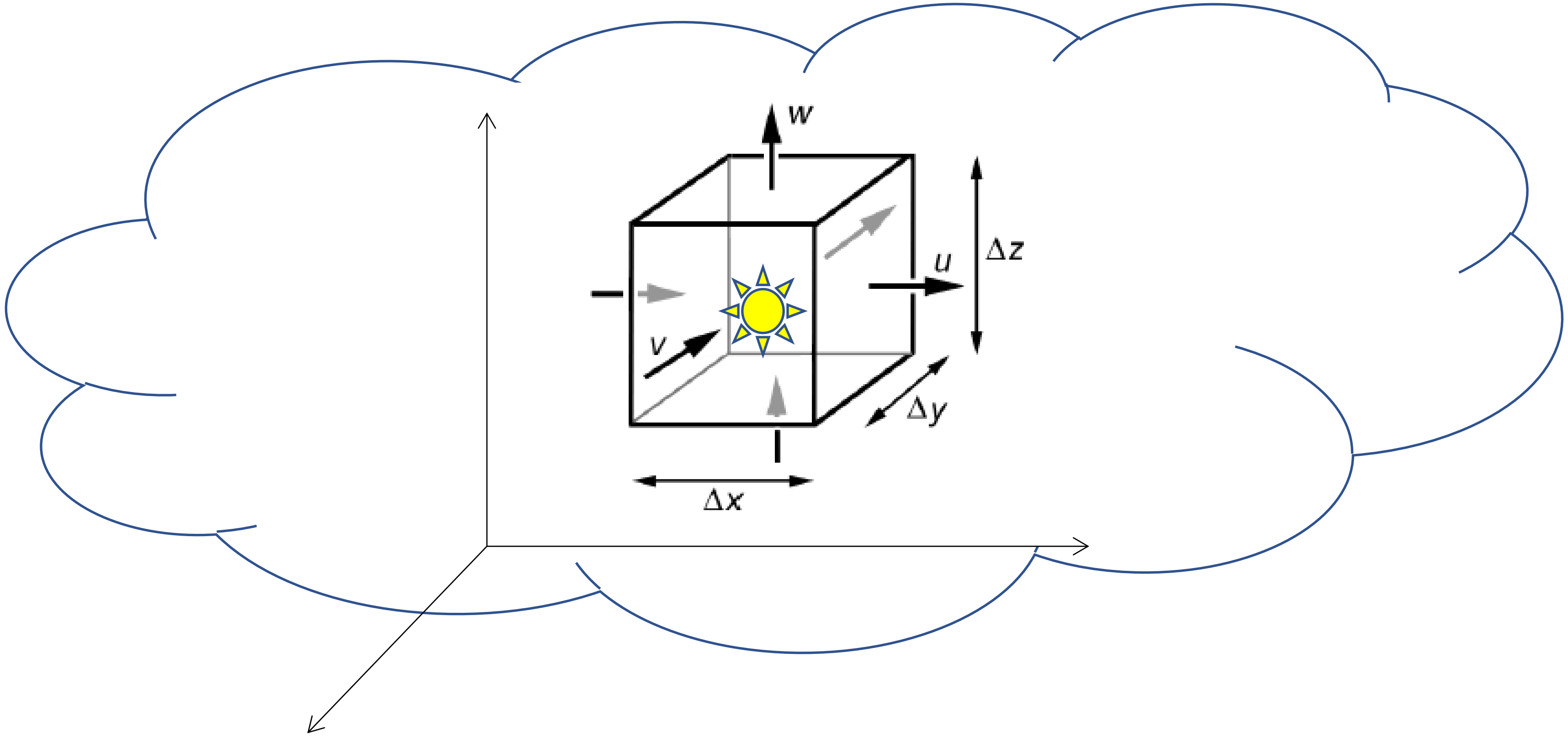
PRINCIPIO FISICO

Um volume de controle pode ser praticamente qualquer coisa imaginável, um pedaço de atmosfera, um trecho de rio, um lago, ou mesmo toda a troposfera.



Exemplos de Volume de controle

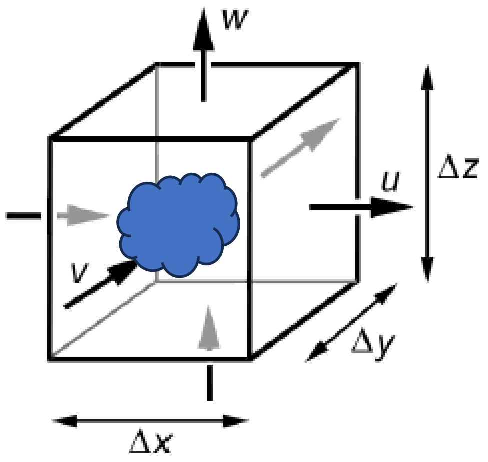
PRINCIPIO FISICO



Quando o fluido é **considerado** como um meio contínuo, a **quantidade física média** que descreve tais troca entre o volume de controle e os seus arredores **é o fluxo**.

PRINCIPIO FISICO (Definição de Fluxo)

O fluxo de qualquer quantidade (massa, momento, energia, substância dissolvida ou suspensa) é definida como a **quantidade da referida quantidade que cruza uma fronteira por unidade de área e por unidade de tempo**



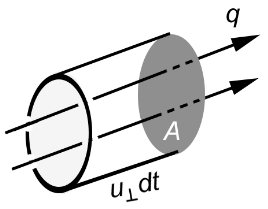
$$fluxo = q = \frac{quantidade\ atravessando\ um\ contorno}{area\ do\ contorno\ \mathbf{X}\ duração\ do\ tempo}$$

$$Fluxo\ de\ Energia = \frac{J}{m^2 s} = \frac{W}{m^2}$$

PRINCIPIO FISICO (Definição de Fluxo)

Por exemplo, a quantidade de massa , então o fluxo é um taxa de massa por unidade de área e por unidade de tempo, para ser expresso em unidades tais como kg/m²s.

$$Fluxo\ de\ Energia = \frac{J}{m^2 s} = \frac{W}{m^2}$$

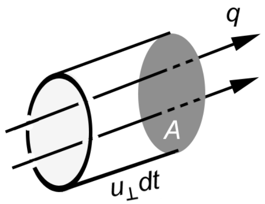


$$fluxo = q = \frac{quantidade\ atravessando\ um\ contorno}{area\ do\ contorno\ \mathbf{X}\ duração\ do\ tempo}$$

$$m = \rho V$$

$$fluxo = \boxed{\frac{quantidade}{Volume\ do\ fluido}}\ X\ \frac{Volume\ do\ fluido\ atravessando\ um\ contorno}{area\ do\ contorno\ \mathbf{X}\ duração\ do\ tempo}$$

PRINCIPIO FISICO (Definição de Fluxo)



$$fluxo = \frac{quantidade}{Volume\ do\ fluido}\ X\ \frac{Volume\ do\ fluido\ atravessando\ um\ contorno}{area\ do\ contorno\ \boldsymbol{X}\ duração\ do\ tempo}$$

$$m = \rho V$$

A "**quantidade por volume de fluido** “$\left[\frac{quantidade}{Volume\ do\ fluido}\right]$ pode ser definido como **c**, **a concentração dessa quantidade**.

$$fluxo = \boldsymbol{c}\ \ X\ \frac{Volume\ do\ fluido\ atravessando\ um\ contorno}{area\ do\ contorno\ \boldsymbol{X}\ duração\ do\ tempo}$$

- Se for massa, **c** é a massa por unidade de volume, isto é, densidade e é definida ρ;

$$fluxo = \rho\ X\ \frac{Volume\ do\ fluido\ atravessando\ um\ contorno}{area\ do\ contorno\ \boldsymbol{X}\ duração\ do\ tempo}$$

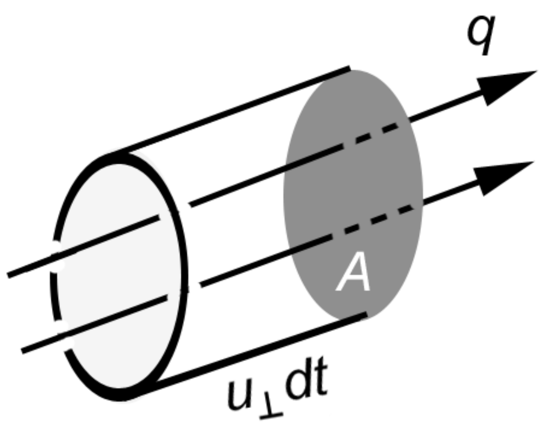
- se for momentum, **c** é a velocidade vezes massa (um vetor) por volume, igual a densidade vezes a velocidade ou $\boldsymbol{\rho\vec{u}}$; etc.

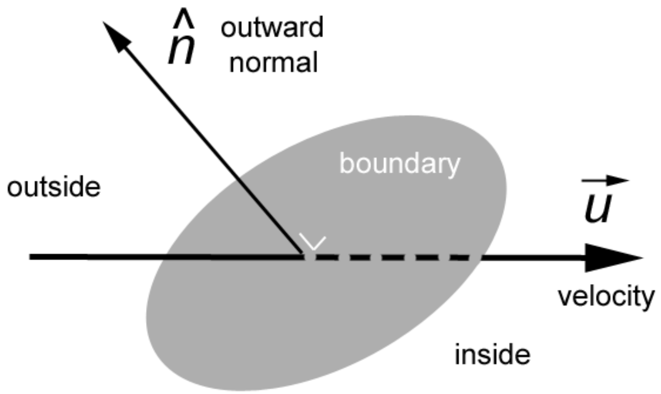
$$fluxo = \boldsymbol{\rho\vec{u}}\ X\ \frac{Volume\ do\ fluido\ atravessando\ um\ contorno}{area\ do\ contorno\ \boldsymbol{X}\ duração\ do\ tempo}$$

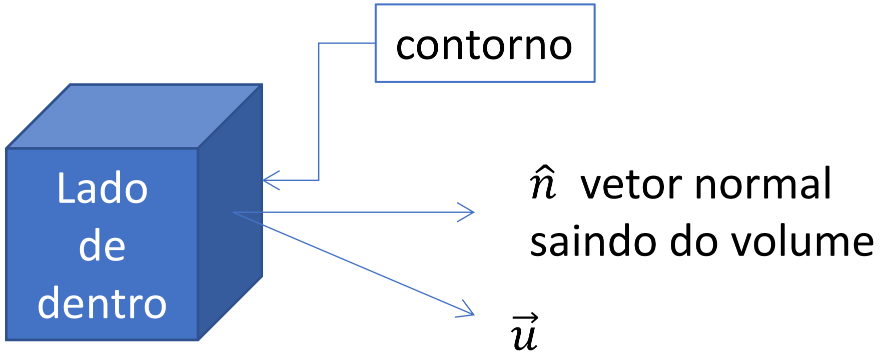
Paulo Yoshio Kubota

Definição de Fluxo

É como o escoamento de uma substancia atravessa uma superfície de contorno

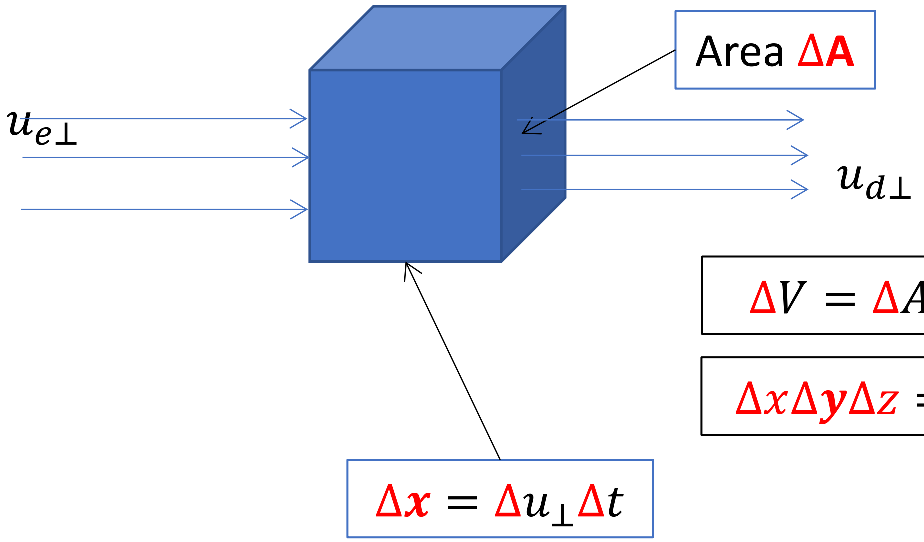






PRINCIPIO FISICO (Definição de Fluxo)

Se a **porção do contorno** em consideração tem uma **área ΔA** . E se $\boldsymbol{u_\perp}$ é o componente da velocidade do escoamento, que é **perpendicular a esta área**, então o **valor da quantidade** que atravessa a área A em um intervalo de tempo $\Delta \boldsymbol{t}$ está todo contido em um **volume de fluido** definido como ΔA base e o seu comprimento $\Delta x = \Delta u_\perp \Delta \boldsymbol{t}$



O **volume de fluido** ΔV atravessando o contorno é

$$\Delta V = \Delta A \Delta u_\perp \Delta t \Rightarrow (area\ vezes\ o\ comprimento)$$

$$\Delta x \Delta \boldsymbol{y} \Delta z = \Delta \boldsymbol{y} \Delta \boldsymbol{z} \Delta u_\perp \Delta t \Rightarrow (area\ vezes\ o\ comprimento)$$

PRINCIPIO FISICO (Definição de Fluxo)

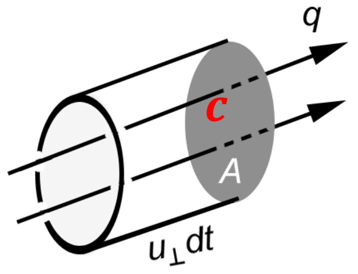
A **quantidade total (m)** transportada pelo volume é dado por $\Delta c \Delta V$ (quantidade no volume (**c**) vezes o volume **(V)**), onde **o fluxo** (quantidade transportada por área por unidade de tempo) é:

$$fluxo = \frac{quantidade}{Volume\ do\ fluido}\ X\ \frac{Volume\ do\ fluido\ atravessando\ um\ contorno}{area\ do\ contorno\ \boldsymbol{X}\ duração\ do\ tempo}$$

$$fluxo = \Delta \boldsymbol{c}\ X\ \frac{Volume\ do\ fluido\ atravessando\ um\ contorno}{area\ do\ contorno\ \boldsymbol{X}\ duração\ do\ tempo}$$

$$\boxed{\boldsymbol{\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \rho V}}$$

$$\boxed{\boldsymbol{\Delta\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V} \Rightarrow \Delta m = \Delta\rho\Delta V = \Delta\rho V}}$$



$$\boxed{\boldsymbol{q = \Delta c \frac{V}{\Delta A \Delta t} = \frac{\Delta c V}{\Delta A \Delta t} = \frac{\Delta c \Delta A \Delta u_{\perp} \Delta t}{\Delta A \Delta t} = \Delta c \Delta u_{\perp} = \Delta c u_{\perp}}}$$

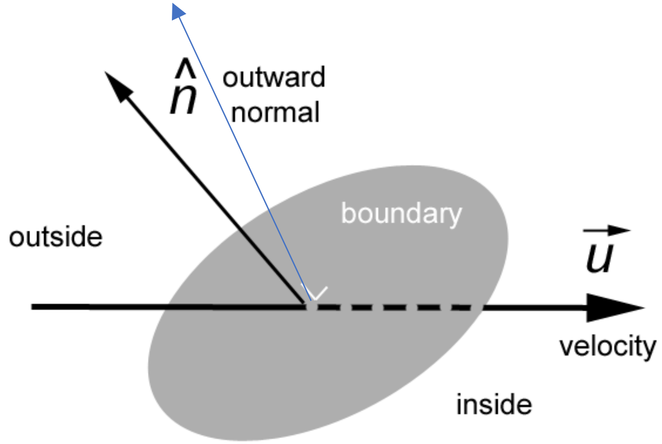
Assim, o fluxo de qualquer quantidade $\boldsymbol{q}$ através de um limite é igual ao produto da concentração da referida quantidade $\Delta \boldsymbol{c}$ (quantidade por volume) pela componente da velocidade perpendicular ao limite $\boldsymbol{u_{\perp}}$.

Paulo Yoshio Kubota

PRINCIPIO FISICO (Definição de Fluxo)

No entanto, como foi apenas definido a componente positiva e orientada ao longo de **n**, isto é, para o exterior de V; para considerar a componente como positivo se for dirigida para dentro de V , precisamos mudar o sinal: $u_{\perp} = -\vec{u} \cdot \hat{n}$. A definição do fluxo é então generalizada, onde **$\hat{n}$ é um vetor unitário 1 perpendicular a área**

$$\boxed{q = \Delta c u_{\perp} = -\Delta c \vec{u} \cdot \hat{n}}$$



Então

$$\boxed{q = \Delta c \vec{u} \cdot \hat{n}}$$

E a quantidade que atravessa a área **A** de um contornos por unidade de tempo é:

$$q = \frac{\textit{quantidade atravessando um contorno}}{\textit{area do contorno X duração do tempo}}$$

$$\boxed{q = \Delta c \vec{u} \cdot \hat{n}}$$

Paulo Yoshio Kubota

PRINCIPIO FISICO (Definição de Fluxo)

$$q = \frac{\textbf{quantidade atravessando um contorno}}{\text{area do contorno } \mathbf{X} \text{ duração do tempo}}$$

$$\boxed{q = \Delta c \frac{\Delta V}{\Delta A \Delta t} = \frac{\Delta c \Delta V}{\Delta A \Delta t}}$$

$$\textbf{quantidade atravessando um contorno} = q \ \mathbf{X} \text{ area do contorno } \mathbf{X} \text{ duração do tempo}$$

$$\boxed{\Delta c \Delta V = q(\Delta A \Delta t)}$$

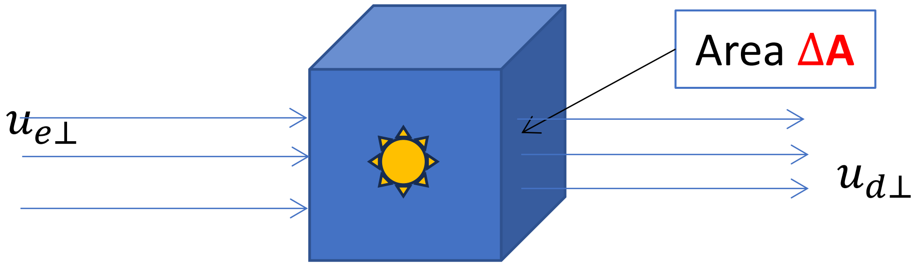
$$\boxed{\frac{\Delta c \Delta V}{\Delta t} = q \Delta A}$$

$$\boxed{\frac{\Delta c V}{\Delta t} = q \Delta A}$$

No limite de um de tempo infinitesimal $\Delta t \to 0$: $\boxed{\Delta V \frac{dc}{dt} = q \Delta A}$

PRINCIPIO FISICO (Definição de Fluxo)

Estamos agora em condições de escrever **um balaço para um volume de controle**. Para levar em conta todo o montante da quantidade em questão, podemos escrever:



$$\boxed{\Delta V \frac{dc}{dt} = q\Delta A}$$

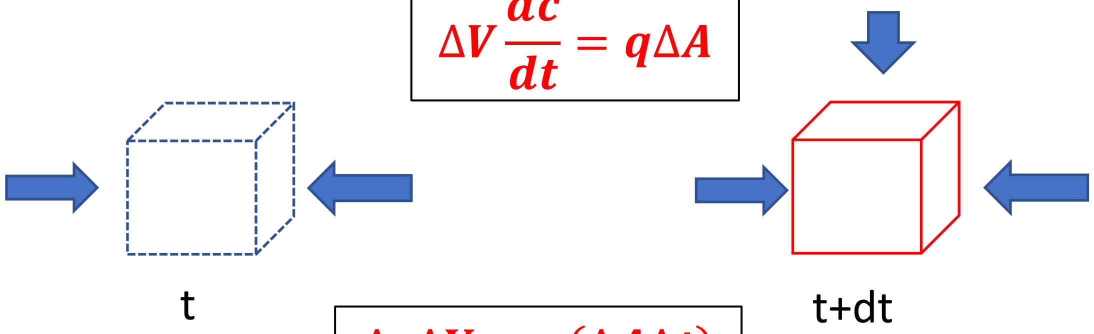
$$Acumulação\ no\ Volume\ de\ Controle = \begin{cases} \sum Importações\ através\ de\ fronteiras \\ -\sum Exportações\ através\ das\ fronteiras \\ +\sum Fontes\ dentro\ do\ volume\ de\ controle \\ -\sum Dissipadores\ dentro\ do\ volume\ de\ controle. \end{cases}$$

PRINCIPIO FISICO (Definição de Fluxo)

O balaço é escrito como uma taxa (ou seja, por unidade de tempo).

A **acumulação** é então a **diferença entre os valores presentes no volume de controle em tempos t e t + dt, dividido pelo variação de tempo dt.**

$$\Delta V \frac{dc}{dt} = q\Delta A$$



$$\Delta c \Delta V = q(\Delta A \Delta t)$$

Durante o período de tempo dt, a taxa de acumulação é:

$$Acumulação\ no\ Volume\ de\ controle = \frac{1}{\Delta t}[(\Delta c\Delta V)_{t+dt} - (\Delta c\Delta V)_{dt}]$$

PRINCIPIO FISICO (Definição de Fluxo)

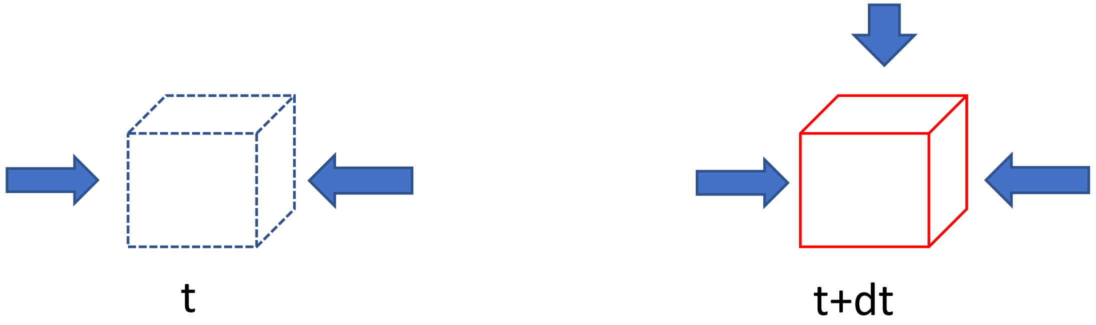
$$Acumulação\ no\ Volume\ de\ controle = \frac{1}{\Delta t}\left[(\Delta c \Delta V)_{t+dt} - (\Delta c \Delta V)_{dt}\right]$$

No limite de um de tempo infinitesimal $\Delta t \rightarrow 0$:

$$Acumulação\ no\ Volume\ de\ controle = \frac{\Delta(cV)}{\Delta t}$$

$$Acumulação\ no\ Volume\ de\ controle = \Delta V \frac{dc}{dt}$$

uma vez que o volume V do volume de controle é fixo ao longo do tempo



Paulo Yoshio Kubota

PRINCIPIO FISICO (Definição de Fluxo)

As exportações através das fronteiras podem ser contado como importações negativas. Assim um único somatório é suficiente para todas as importações e exportações. Por unidade de tempo, esta soma é:

$$\boxed{\boldsymbol{q = \frac{\Delta c V}{\Delta A \Delta t} = \frac{\Delta c \Delta A \Delta u_{\perp} \Delta t}{\Delta A \Delta t} = \Delta c \Delta u_{\perp} = \Delta c u_{\perp}}}$$

$$\sum As\ importações, menos\ as\ exportações\ através\ de\ fronteiras = \sum q_i \Delta A_i$$

$$\boxed{\boldsymbol{\frac{\Delta c V}{\Delta t} = q \Delta A}}$$

$$\sum As\ importações, menos\ as\ exportações\ através\ de\ fronteiras = \sum \Delta c_i \Delta u_{\perp i} \Delta A_i$$

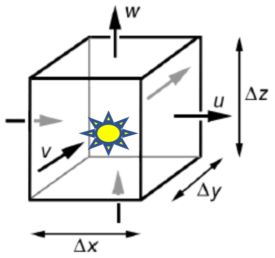
$$\boxed{\sum As\ importações, menos\ as\ exportações\ através\ de\ fronteiras = \sum \Delta c_i (\overrightarrow{\Delta u_i} \cdot \hat{n}_i) \Delta A_i}$$

PRINCIPIO FISICO (Definição de Fluxo)

A determinação das **fontes** e **sumidouros dentro do volume de controle** requer a especificação da quantidade para a qual o balanço é executado (massa, momento, energia, etc)

- Um **conhecimento dos mecanismos** pelos quais essa quantidade pode ser gerada ou dissipada.

Por enquanto, vamos apenas assumir todas as fontes e sumidouros em um único termo S, igual ao montante líquido da quantidade que é gerada no interior do volume de controle por unidade de tempo:



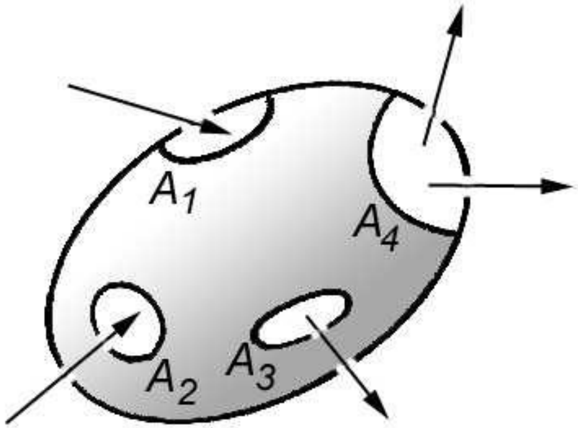
$$\sum Fontes\ menos\ souvedouros\ dentro\ do\ valume\ de\ controle = S$$

Paulo Yoshio Kubota

Agora, com todas as peças juntas, formam o balaço torna-se:

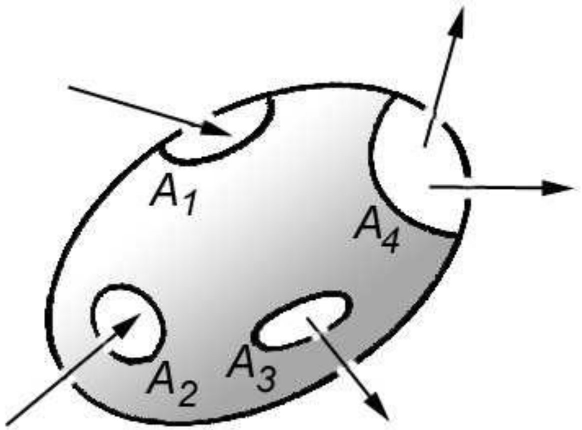
$$\Delta V \frac{dc}{dt} = \sum \Delta c_i \Delta u_{\perp i} \Delta A_i + S$$

Onde mais uma vez a soma sobre o **índice** i abrange todas as entradas e saídas do **volume de controle**.



De fato, "tudo tem que ir a algum lugar", e não há nenhuma fonte ou sumidouro de massa.

Nos sistemas de fluido, isto significa que a diferença entre quantidade de massa que entra no volume controle e a quantidade de massa que sai dele cria uma ***acumulação igual de fluido no interior desse volume***



$$\Delta V \frac{dc}{dt} = \sum \Delta c_i \Delta u_{\perp i} \Delta A_i + S$$

Quando a quantidade em questão é massa, a concentração Δc_i torna-se massa por volume, ou densidade, que definimos por ρ (unidades: kg / m^3).

Como não existe uma fonte ou sumidouro de massa (S = 0), o balaço torna-se:

$$\Delta V \frac{d\rho}{dt} = \sum \Delta c_i \Delta u_{\perp i} \Delta A_i$$

$$\Delta V \frac{d\rho}{dt} = \sum \rho \Delta u_{\perp i} \Delta A_i$$

Balaço para um Volume Infinitesimal

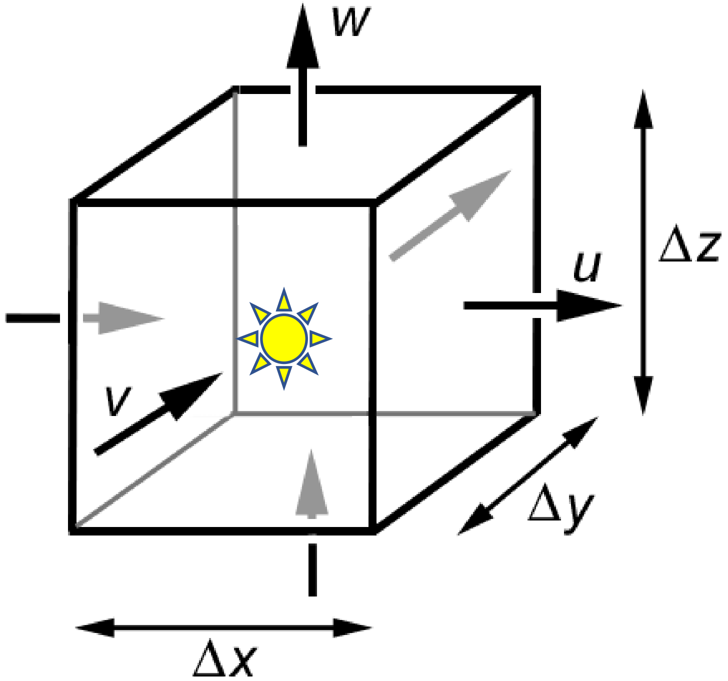
Em tais casos, e muitos outros, uma **representação contínua do fluido** é necessário, para **obter** as **equações governantes**, onde se aplica a análise para um elemento de volume **infinitesimal**

$$\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$$

$$\Delta x \rightarrow 0; \Delta y \rightarrow 0; \Delta z \rightarrow 0$$

PRINCIPIO FISICO (Definição de Fluxo)

Este volume paralelepípedo tem seis lados e, portanto, sujeito a seis fluxos distintos da quantidade arbitrária c.

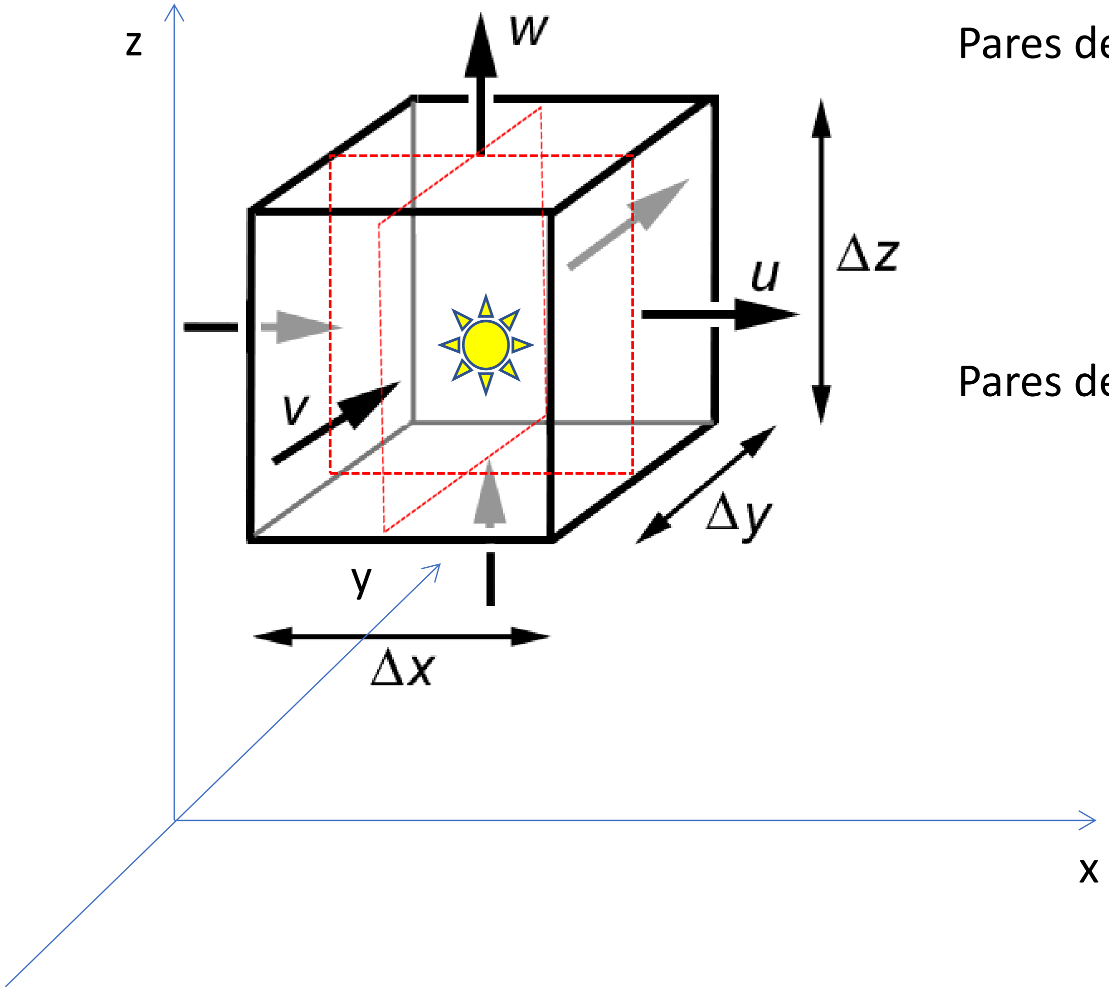


$$\Delta V \frac{d\rho}{dt} = \sum \Delta c_i \Delta u_{\perp i} \Delta A_i$$

Nos lados esquerdo e direito, a quantidade **c** **entra** e **sai** com a velocidade u da componente–x, e é necessário fazer a **distinção** entre os valores de **c** e **u** à **esquerda (x -Δx /2)**, e a **direita (em x +Δx/2)**

Paulo Yoshio Kubota

PRINCIPIO FISICO (Definição de Fluxo)



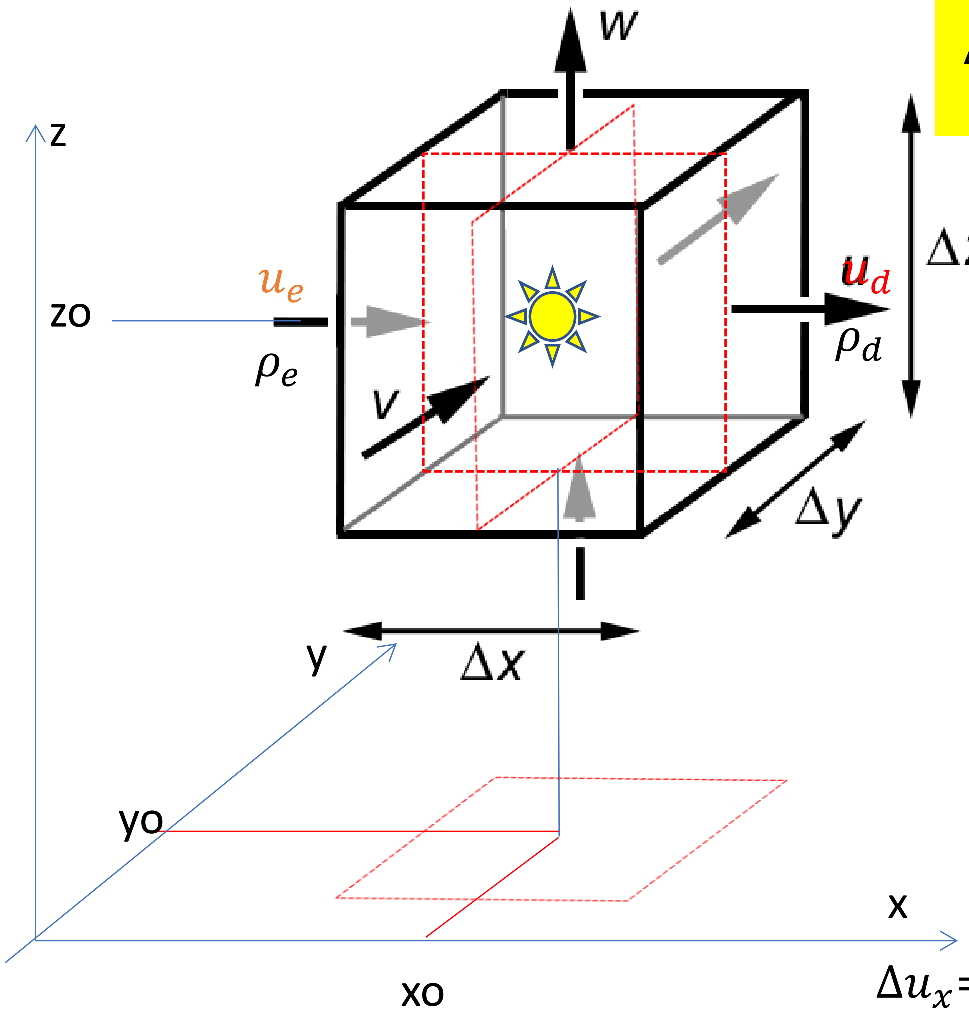
Pares de fluxos que entram e saem através Y

$$y + \frac{\Delta y}{2}$$

Pares de fluxos que entram e saem através Z

$$z + \frac{\Delta z}{2}$$

PRINCIPIO FISICO (Componente de Fluxo no eixo x)



$$\Delta V \frac{dc}{dt} = \sum \Delta c_i \Delta u_{\perp i} \Delta A_i + S$$

$$\Delta u_e - \Delta u_d = \Delta \vec{v}_{i\perp}$$

$$u_d = u_0 + \frac{\partial u}{\partial x}(x - x_0)$$

$$\Delta u_d = u_d - u_0 = +\frac{\partial u}{\partial x}\left(\frac{\Delta x}{2}\right)$$

$$u_e = u_0 + \frac{\partial u}{\partial x}(x - x_0)$$

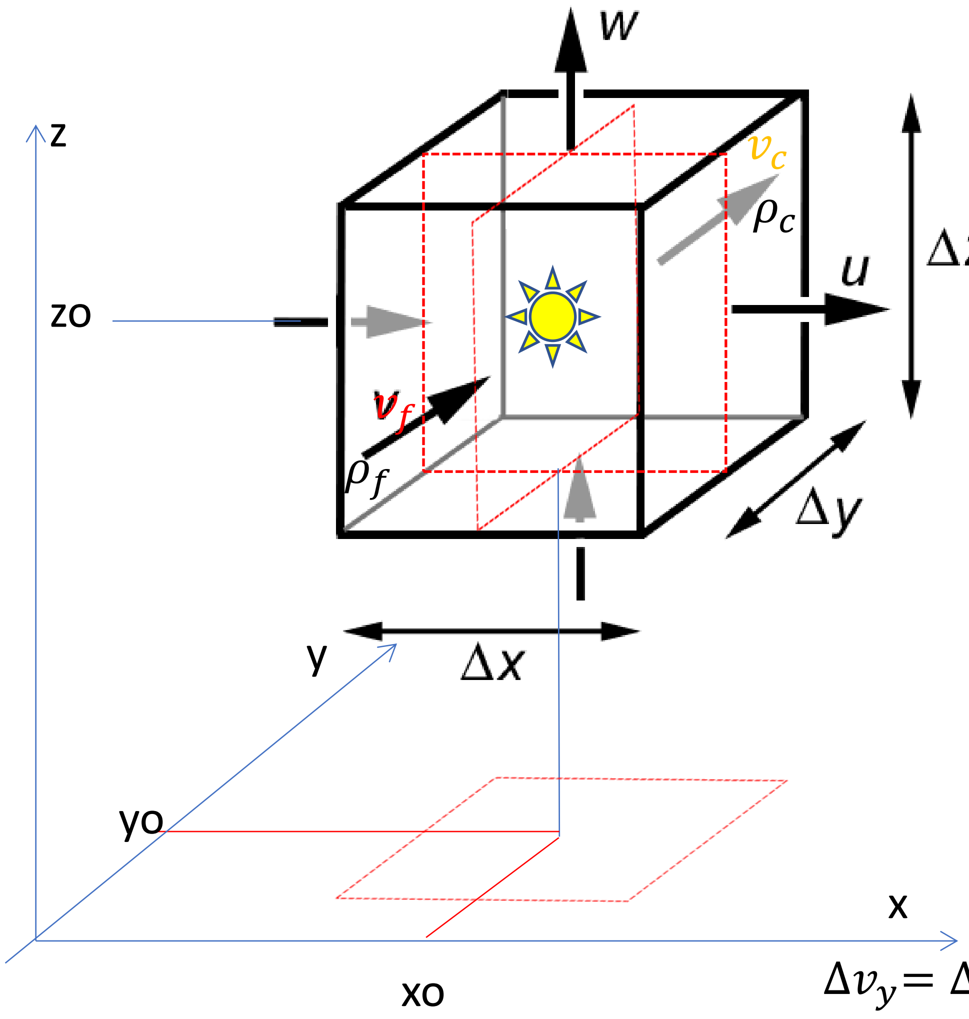
$$\Delta u_e = u_e - u_0 = -\frac{\partial u}{\partial x}\left(\frac{\Delta x}{2}\right)$$

$$\Delta u_x = \Delta u_e \text{-} \Delta u_d = \left(-\frac{\partial u}{\partial x}\left(\frac{\Delta x}{2}\right) - \frac{\partial u}{\partial x}\left(\frac{\Delta x}{2}\right)\right)$$

$$\Delta u_x = -\left(\frac{\partial u}{\partial x}\Delta x\right)$$

Paulo Yoshio Kubota

PRINCIPIO FISICO (Componente de Fluxo no eixo y)



$$\Delta V\frac{dc}{dt}=\sum \Delta c_i \Delta u_{\perp i}\Delta A_i + S$$

$$v_f - v_c = \vec{v}_{i\perp}$$

$$v_c = v_0 + \frac{\partial v}{\partial y}(y-y_0)$$

$$\Delta v_c = v_c - v_0 = +\frac{\partial v}{\partial y}\left(\frac{\Delta y}{2}\right)$$

$$v_f = v_0 + \frac{\partial v}{\partial y}(y-y_0)$$

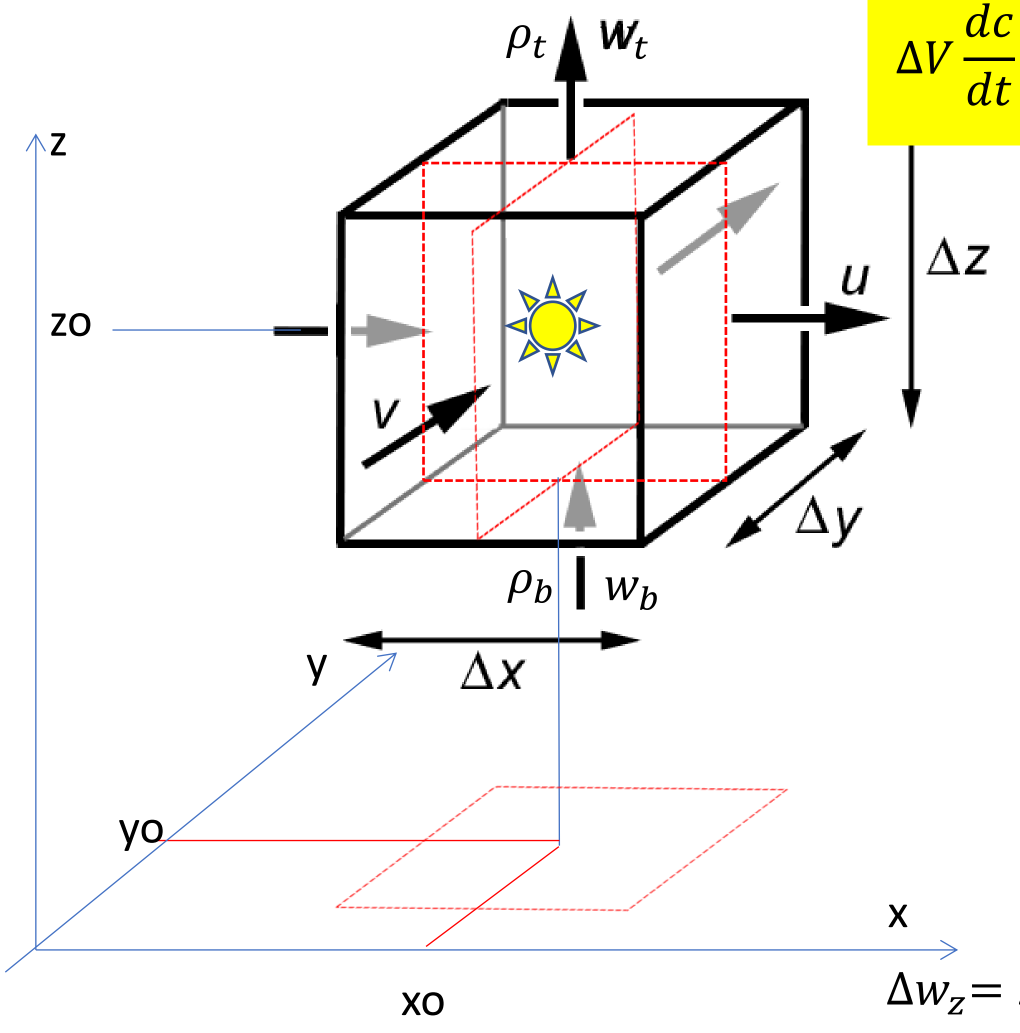
$$\Delta v_f = v_f - v_0 = -\frac{\partial v}{\partial y}\left(\frac{\Delta y}{2}\right)$$

$$\Delta v_y = \Delta v_f \text{-} \Delta v_c = \left(-\frac{\partial v}{\partial y}\left(\frac{\Delta y}{2}\right) - \frac{\partial v}{\partial y}\left(\frac{\Delta y}{2}\right)\right)$$

$$\Delta v_y = -\left(\frac{\partial v}{\partial y}\Delta y\right)$$

Paulo Yoshio Kubota

PRINCIPIO FISICO (Componente de Fluxo no eixo z)



$$\Delta V \frac{dc}{dt} = \sum \Delta c_i \Delta u_{\perp i} \Delta A_i + S$$

$$w_b - w_t = \Delta \vec{v}_{i\perp}$$

Expansão de Taylor

$$w_t = w_0 + \frac{\partial w}{\partial z}(w - w_0)$$

$$\Delta w_t = w_t - w_0 = + \frac{\partial w}{\partial z}\left(\frac{\Delta z}{2}\right)$$

Expansão de Taylor

$$w_b = w_0 + \frac{\partial w}{\partial z}(z - z_0)$$

$$\Delta w_b = w_b - w_0 = - \frac{\partial w}{\partial z}\left(\frac{\Delta z}{2}\right)$$

$$\Delta w_z = \Delta w_b - \Delta w_t = \left(-\frac{\partial w}{\partial z}\left(\frac{\Delta z}{2}\right) - \frac{\partial w}{\partial z}\left(\frac{\Delta z}{2}\right)\right)$$

$$w_z = -\left(\frac{\partial w}{\partial z}\Delta z\right)$$

Paulo Yoshio Kubota

PRINCIPIO FISICO (Definição de Fluxo)

$$\Delta V \frac{dc}{dt} = \sum \Delta c_i \Delta u_{\perp i} \Delta A_i + S$$

$$\Delta u_x = -\left(\frac{\partial u}{\partial x}\Delta x\right) \qquad \Delta v_y = -\left(\frac{\partial v}{\partial y}\Delta y\right) \qquad \Delta w_z = -\left(\frac{\partial w}{\partial z}\Delta z\right)$$

$$\Delta x \Delta y \Delta z \frac{dc}{dt} = \Delta c_x \Delta u_x \Delta A_x + \Delta c_y \Delta v_y \Delta A_y + \Delta c_z \Delta w_z \Delta A_z + S$$

$$\Delta x \Delta y \Delta z \frac{dc}{dt} = \Delta c_x \Delta u_x \Delta y \Delta z + \Delta c_y \Delta v_y \Delta \mathrm{x} \Delta z + \Delta c_z \Delta w_z \Delta x \Delta y + S$$

$$\Delta x \Delta y \Delta z \frac{dc}{dt} = -\Delta c_x \left(\frac{\partial u}{\partial x}\Delta x\right) \Delta y \Delta z - \Delta c_y \left(\frac{\partial v}{\partial y}\Delta y\right) \Delta \mathrm{x} \Delta z - \Delta c_z \left(\frac{\partial w}{\partial z}\Delta z\right) \Delta x \Delta y + S$$

Considere um fluido isotrópico

A **isotropia** é a propriedade que caracteriza as substâncias que possuem as mesmas propriedades físicas independentemente da direção considerada, mas dependem da posição no espaço.

$$c = \Delta c_x = \Delta c_y = \Delta\, c_z = \rho(x, y, z)$$

PRINCIPIO FISICO (Definição de Fluxo)

$$\Delta V\frac{dc}{dt} = \sum \Delta c_i \Delta u_{\perp i} \Delta A_i + S$$

$$\Delta x\Delta y\Delta z\frac{d\rho}{dt} = -\rho\left(\frac{\partial u}{\partial x}\Delta x\right)\Delta y\Delta z - \rho\left(\frac{\partial v}{\partial y}\Delta y\right)\Delta \mathrm{x}\Delta z - \rho\left(\frac{\partial w}{\partial z}\Delta z\right)\Delta x\Delta y + S$$

$$\Delta x\Delta y\Delta z\frac{d\rho}{dt} = -\rho\frac{\partial u}{\partial x}\Delta x\Delta y\Delta z - \rho\frac{\partial v}{\partial y}\Delta y\Delta \mathrm{x}\Delta z - \rho\frac{\partial w}{\partial z}\Delta z\Delta x\Delta y + S$$

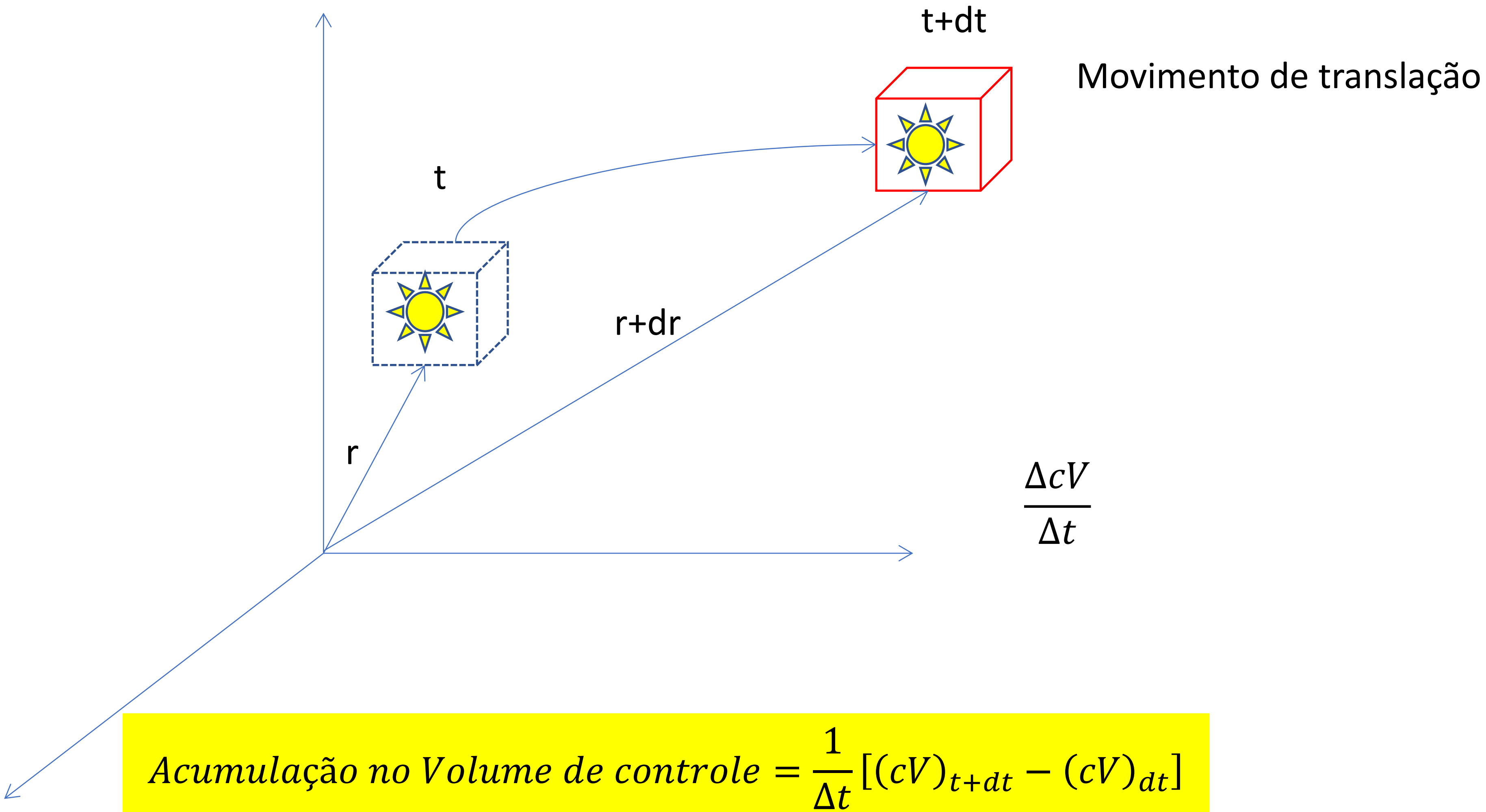
Dividindo a equação por $\Delta x\Delta y\Delta z$

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho\frac{\partial u}{\partial x} - \rho\frac{\partial v}{\partial y} - \rho\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{S}{\Delta x\Delta y\Delta z}$$

$$\boxed{\frac{d\rho}{dt} + \rho\frac{\partial u}{\partial x} + \rho\frac{\partial v}{\partial y} + \rho\frac{\partial w}{\partial z} = \frac{S}{\Delta x\Delta y\Delta z}}$$

Acumulação no Volume de Controle

A **acumulação** é a **diferença entre os valores presentes no volume de controle em tempos t e t + dt, dividido pelo variação de tempo dt.**



$$\frac{\Delta cV}{\Delta t}$$

$$Acumulação\ no\ Volume\ de\ controle = \frac{1}{\Delta t}[(cV)_{t+dt} - (cV)_{dt}]$$

Acumulação no Volume de Controle

No tempo t o volume de controle encontra na posição x,y,z e possui uma quantidade de volume (**c**)

$$c]_t = c(x, y, z, t)$$

No tempo *t +dt* a volume de controle move-se para uma nova posição com coordenadas *x+dx, y+dy,z+dz* e possui uma quantidade de volume dada por:

$$c]_{t+dt} = c(x+dx, y+dy, z+dz, t+dt)$$

A variação da quantidade de volume (**c**) do volume de controle movendo-se da posição *r* para *r+dr* é dada por: (expansão em série de taylor)

$$c(x,y,z,t) = c_0(x,y,z,t) + \frac{\partial c}{\partial x}\Delta x + \frac{\partial c}{\partial y}\Delta y + \frac{\partial c}{\partial z}\Delta z + \frac{\partial c}{\partial t}\Delta t + \frac{\partial^2 c}{\partial^2 x}\frac{\Delta x^2}{2!} + \frac{\partial^2 c}{\partial^2 y}\frac{\Delta y^2}{2!} + \frac{\partial^2 c}{\partial^2 z}\frac{\Delta z^2}{2!} + \frac{\partial^2 c}{\partial^2 t}\frac{\Delta t^2}{2!} + \cdots..$$

Paulo Yoshio Kubota

Truncando a serie nos termos de primeira ordem a equação se reduz a:

$$c(x,y,z,t) - c_0(x,y,z,t) = +\frac{\partial c}{\partial x}\Delta x + \frac{\partial c}{\partial y}\Delta y + \frac{\partial c}{\partial z}\Delta z + \frac{\partial c}{\partial t}\Delta t$$

$$\Delta c = +\frac{\partial c}{\partial x}\Delta x + \frac{\partial c}{\partial y}\Delta y + \frac{\partial c}{\partial z}\Delta z + \frac{\partial c}{\partial t}\Delta t$$

Difidindo a equação por Δt

$$\frac{\Delta c}{\Delta t} = +\frac{\partial c}{\partial x}\frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{\partial c}{\partial y}\frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{\partial c}{\partial z}\frac{\Delta z}{\Delta t} + \frac{\partial c}{\partial t}\frac{\Delta t}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta c}{\Delta t} = +\frac{\partial c}{\partial x}\frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{\partial c}{\partial y}\frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{\partial c}{\partial z}\frac{\Delta z}{\Delta t} + \frac{\partial c}{\partial t}$$

Fazendo o limite de $\Delta t \to 0$

$$\frac{dc}{dt} = +\frac{\partial c}{\partial x}\frac{dx}{dt} + \frac{\partial c}{\partial y}\frac{dy}{dt} + \frac{\partial c}{\partial z}\frac{dz}{dt} + \frac{\partial c}{\partial t}$$

$$\frac{dc}{dt} = +\frac{\partial c}{\partial x}\frac{dx}{dt} + \frac{\partial c}{\partial y}\frac{dy}{dt} + \frac{\partial c}{\partial z}\frac{dz}{dt} + \frac{\partial c}{\partial t}$$

$$u = \frac{dx}{dt} \qquad v = \frac{dy}{dt} \qquad w = \frac{dz}{dt}$$

$$\frac{dc}{dt} = +u\frac{\partial c}{\partial x} + v\frac{\partial c}{\partial y} + w\frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial c}{\partial t}$$

PRINCIPIO FISICO (Definição de Fluxo)

$$V\frac{dc}{dt} = \sum c_i u_{\perp i} A_i + S$$

$$\frac{dc}{dt} = +u\frac{\partial c}{\partial x} + v\frac{\partial c}{\partial y} + w\frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial c}{\partial t}$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho\frac{\partial u}{\partial x} + \rho\frac{\partial v}{\partial y} + \rho\frac{\partial w}{\partial z} = \frac{S}{\Delta x \Delta y \Delta z}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + u\frac{\partial\rho}{\partial x} + v\frac{\partial\rho}{\partial y} + w\frac{\partial\rho}{\partial z} + \rho\frac{\partial u}{\partial x} + \rho\frac{\partial v}{\partial y} + \rho\frac{\partial w}{\partial z} = \frac{S}{\Delta x \Delta y \Delta z}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + u\frac{\partial\rho}{\partial x} + \rho\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial\rho}{\partial y} + \rho\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial\rho}{\partial z} + \rho\frac{\partial w}{\partial z} = \frac{S}{\Delta x \Delta y \Delta z}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial\rho u}{\partial x} + \frac{\partial\rho v}{\partial y} + \frac{\partial\rho w}{\partial z} = \frac{S}{\Delta x \Delta y \Delta z}$$

PRINCIPIO FISICO (Definição de Fluxo)

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial\rho u}{\partial x}+\frac{\partial\rho v}{\partial y}+\frac{\partial\rho w}{\partial z}=\frac{S}{\Delta x\Delta y\Delta z}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\nabla\cdot\overrightarrow{\rho V}=\frac{S}{\Delta x\Delta y\Delta z}$$

Equação da Conservação da Massa

As ***equações integrais*** de Mecânica dos Fluidos são utilizadas num **volume de controle (V.C.)** para analisar o campo de **escoamento de maneira global**.

As ***equações diferenciais*** são utilizadas para estudar o campo de escoamento em forma mais detalhada.

Equação da Conservação da Massa

Para obter a **expressão** que define a **conservação da massa na forma diferencial**, fazemos uma **análise** de um **volume de controle diferencial** num sistema de coordenadas cartesiano.

$$\boxed{\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{V} = \frac{S}{\Delta x \Delta y \Delta z}}$$

O princípio da conservação da massa é definido como:

$$\begin{bmatrix} \text{taxa de variação} \\ \text{da massa no V.C.} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{taxa de fluxo resultante} \\ \text{através do V.C.} \end{bmatrix} = 0$$

$$\boxed{\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{V} = 0}$$

Equação da Conservação da Massa

Na *forma integral* esta expressão é dada por:

TEMA: TEOREMA DIVERGÊNCIA DE GAUSS

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{VC}\rho dV + \int_{VC}\nabla\cdot\overrightarrow{\rho V}dV = 0$$

$$\iiint_W (\nabla\cdot \mathrm{F})dV = \iint_{\partial W}\mathrm{F}\cdot d\mathbf{S}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{VC}\rho dV = \int_{SC}\rho\vec{V}d\vec{A} = 0$$

A massa dentro do **V.C**. a qualquer instante é produto da massa específica (ρ) e o volume (***dxdydz***). Desta forma a taxa de variação da massa dentro do volume de controle na forma diferencial é dada por:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}\int_{VC}\rho dV = \frac{\partial \rho}{\partial t}\int_{VC}dV = \frac{\partial \rho}{\partial t}\int_{VC}dxdydz = \frac{\partial \rho}{\partial t}xyz$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{VC}\rho dV = \frac{\partial \rho}{\partial t}\int_{VC}dxdydz$$

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial t}xyz = \frac{\partial \rho V}{\partial t}$$

Equação da Conservação da Massa

Pode ser demonstrado que a **taxa de fluxo** resultante através da superfície de controle é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{VC}\rho dV + \int_{VC}\nabla\cdot\overrightarrow{\rho\vec{V}}dV = 0$$

$$\int_{VC}\nabla\cdot\overrightarrow{\rho\vec{V}}dV = \int_{SC}\rho\vec{V}d\vec{A}$$

$$\int_{VC}\nabla\cdot\overrightarrow{\rho\vec{V}}dV = \int_{SC}\rho\vec{V}d\vec{A} = \left[\frac{\partial\rho u}{\partial x} + \frac{\partial\rho v}{\partial z} + \frac{\partial\rho w}{\partial z}\right]\text{dxdydz}$$

Desta forma a equação da *conservação da massa* na forma diferencial é dada por:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \left[\frac{\partial\rho u}{\partial x} + \frac{\partial\rho v}{\partial y} + \frac{\partial\rho w}{\partial z}\right] = 0$$

Em notação vetorial é definido o *operador nabla* como:

$$\nabla = i\frac{\partial}{\partial x} + j\frac{\partial}{\partial y} + k\frac{\partial}{\partial z}$$

Equação da Conservação da Massa

De tal forma que a equação da conservação da massa considerando uma taxa de variação nula pode ser reduzida a:

$$\rho\left[\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right]=\nabla\cdot\rho\vec{V}$$

Na forma vetorial a equação da conservação da massa pode ser representada como:

$$\boxed{\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\rho\vec{V}=0}$$

Escoamento Incompressível

No caso de *escoamento* ***incompressível*** ρ=constante. Isto significa que a massa específica não é função do tempo nem das coordenadas espaciais.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \vec{V} = 0 \qquad \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

ou na forma vetorial

$$\nabla . \vec{V} = 0$$

Escoamento Permanente

No caso de **escoamento permanente** *todas as propriedades do fluido são* ***independentes do tempo***.
Desta forma, no máximo, poderá ocorrer é que ***V****(x,y,z)* e *(x,y,z)* sendo a equação da continuidade dada por:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0$$

ou na forma vetorial

$$\boxed{\nabla \rho \vec{V} = 0}$$