

## IMPACTO DE UMA GOTA EM UMA ESFERA ESTACIONÁRIA

Saulo Andrade Pinto, saulo.pinto@ufu.br<sup>1</sup>

Aristeu da Silveira Neto, aristeus@ufu.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Uberlândia, Campus Santa Mônica, Laboratório de Mecânica dos Fluidos, Bloco 5P

**Resumo.** Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos na simulação computacional de um escoamento bifásico com fronteira imersa, focalizando no impacto de uma gota em uma esfera estacionária utilizando o software MFSim, desenvolvido no Laboratório de Mecânica dos Fluidos (MFLab) - Universidade Federal de Uberlândia (UFU). O estudo começa com a apresentação do modelo físico com as hipóteses simplificadoras utilizadas. Em seguida, o modelo matemático referente as equações que modelam o escoamento, e posteriormente o modelo computacional descrevendo as variáveis utilizadas para a simulação computacional. Para realizar a simulação, são utilizadas as metodologias de volume de fluidos (VOF), fronteira imersa (IB) e malha adaptativa, com o pós processamento de imagens sendo realizado através do software ParaView. Os resultados obtidos mostram o comportamento da densidade dos fluidos, do campo de pressão e da viscosidade ao longo do escoamento, destacando o gradiente de pressão nos instantes imediatamente anterior e posterior ao impacto da gota com a esfera.

**Palavras chave:** CFD. Volume de Fluidos. Fronteira Imersa. Malha adaptativa.

**Abstract.** In this work, the results obtained from the computational simulation of a two-phase flow with immersed boundary are presented, focusing on the impact of a droplet on a stationary sphere using the MFSim software, developed by the Fluid Mechanics Laboratory (MFLab) - Federal University of Uberlândia (UFU). The study begins with the presentation of the physical model with the simplifying assumptions used. After this, the mathematical model referring to the equations that model the flow, and subsequently the computational model describing the variables used for the computational simulation. To perform the simulation, the methodologies of volume of fluids (VOF), immersed boundary (IB), and adaptive mesh are used, with image post-processing being carried out through ParaView software. The results obtained show the behavior of fluid density, pressure and viscosity fields, along the flow, highlighting the pressure gradient at the time immediately before and after the impact of the droplet with the sphere.

**Keywords:** CFD, Volume of Fluid, Immersed Boundary, Adaptive Mesh.

### 1. INTRODUÇÃO

Neste artigo trata-se da simulação computacional de uma gota em queda em um domínio gasoso que contém uma esfera sólida estacionária, tendo como referência Deen (2006). É utilizada a metodologia de volume de fluidos (VOF), fronteira imersa (IB) e malha adaptativa.

A metodologia VOF é usada para realizar aproximações de fronteiras livres entre regiões de fluidos em simulações computacionais. Ele foi introduzido por Hirt e Nichols (1981). De acordo com Gomes da Silva (2018), este método é um dos mais aplicados para simulações de escoamentos multifásicos, devido a sua maior flexibilidade e eficiência comparado a outros métodos de fronteira livre.

No método IB, de acordo com Silva Melo (2017), são criadas duas malhas independentes, para as variáveis eulerianas e lagrangeanas. A malha euleriana é utilizada para as equações de balanço e a malha lagrangeana para representar a fronteira imersa. De acordo com Petri (2010) pode-se modelar esta interação através de uma aproximação discreta da função delta de Dirac.

A metodologia de malha adaptativa, segundo Lima (2012), consiste na utilização de um refinamento mais apurado em regiões de interesse no domínio, para a captura de fenômenos locais, enquanto para as regiões restantes, utiliza-se uma malha mais grosseira.

O impacto de uma gota em uma esfera estacionária é classificado como um escoamento incompressível bifásico isotérmico, que nas palavras de Neto (2020):

"São os escoamentos cujos movimentos relativos entre as fases são promovidos apenas por efeito gravitacionais, ou seja, sem efeitos forçados. Para esse grupo de escoamentos, a massa específica  $\rho(\vec{x}, t)$  e a viscosidade dinâmica  $\mu(\vec{x}, t)$  variam no tempo e no espaço, devido ao deslocamento das fases que compõem o fluido em escoamento. Consideram-se, no entanto, que essas propriedades físicas sejam constantes em cada fase."

## 2. METODOLOGIA

A análise do escoamento é dividida em modelo físico, modelo matemático e modelo computacional. No modelo físico tem-se a descrição do problema, das hipóteses simplificadores e a das variáveis utilizadas. No modelo matemático tem-se as equações de balanço utilizadas e o estabelecimento de uma função indicadora para a interação da fase contínua com a fase dispersa. No modelo computacional são descritos os parâmetros de controle de malha, parâmetros temporais, parâmetros geométricos e modelo de discretização utilizados na simulação.

Os parâmetros adimensionais que caracterizam o escoamento bifásico são os seguintes: razão de viscosidade dinâmica  $\lambda = 0, 1$  (razão entre as viscosidades dinâmicas das fases contínua e dispersa);  $\eta = 0, 1$  (razão entre as massas específicas das fases contínua e dispersa);  $Eu = 36$  (Número de Eötvös),  $Mo = 9 \cdot 10^{-6}$  (Número de Morton) e  $Re_D \sim 160$  (Número de Reynolds).

### 2.1 Modelo Físico

Na Figura 1 tem-se a ilustração do modelo físico. As hipóteses assumidas são de escoamento transiente, fluidos newtonianos e escoamento incompressível.

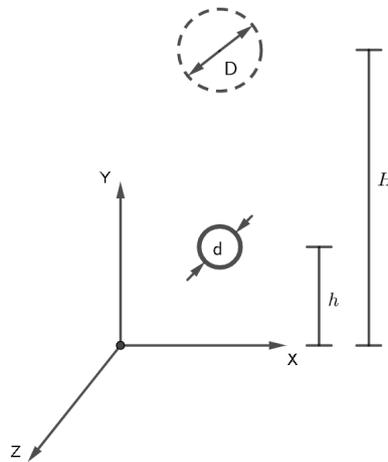


Figura 1. Ilustração do modelo físico

Tabela 1. Valores das variáveis.

Variável	Símbolo	Valor
Gravidade no eixo Y ( $m/s^2$ )	$g_Y$	-10
Massa específica da fase contínua ( $kg/m^3$ )	$\rho_c$	100
Massa específica da fase dispersa ( $kg/m^3$ )	$\rho_d$	1000
Viscosidade da fase contínua ( $Pa \cdot s$ )	$\mu_c$	0,01
Viscosidade da fase dispersa ( $Pa \cdot s$ )	$\mu_d$	0,1
Tensão superficial ( $N/m$ )	$\sigma$	0,1
Diâmetro da gota (m)	D	0,02
Diâmetro da esfera (m)	d	0,01
Altura do centro da gota (m)	H	0,072
Altura do centro da esfera (m)	h	0,024

### 2.2 Modelo Matemático

Sob as hipóteses do escoamento incompressível isotérmico e que a massa específica é uma constante em cada fase, pode-se simplificar a equação da continuidade de acordo com a Eq. (1).

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

A Equação (2) é a Equação de Navier-Stokes com o termo de força adicional ( $\vec{f}(\vec{x}, t)$ ).

$$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho\vec{V}\vec{V}) = -\vec{\nabla}p + \rho\vec{g} + \vec{\nabla}[\mu(\vec{\nabla}\vec{V} + \vec{\nabla}\vec{V}^T)] + \vec{f}(\vec{x}, t) \quad (2)$$

De acordo com (Neto, 2020), o termo  $\vec{f}(\vec{x}, t)$  representa o campo de força interfacial que aparece entre os fluidos,  $\rho(\vec{x}, t)$  e  $\mu(\vec{x}, t)$ , são as propriedades físicas do fluido, que devem ser especificadas em função do tempo e do espaço para a solução da Eq. (1) e Eq. (2). Para isto, uma função indicadora é utilizada, dada pela Eq. (3).

$$0 \leq I(\vec{x}, t) \leq 1 \quad (3)$$

Em que,  $I = 0$  na fase contínua e  $I = 1$  na fase dispersa. A função  $I(\vec{x}, t)$  deve ser utilizada para o estabelecimento dos dois campos. O estabelecimento desses dois campos é realizado de acordo com a Eq. (4) e a Eq. (5).

$$\rho(\vec{x}, t) = I(\vec{x}, t)\rho_d + (1 - I(\vec{x}, t))\rho_c \quad (4)$$

$$\mu(\vec{x}, t) = I(\vec{x}, t)\mu_d + (1 - I(\vec{x}, t))\mu_c \quad (5)$$

Em que  $\rho_c, \rho_d, \mu_c$  e  $\mu_d$  são as propriedades físicas relativas às fases contínua e dispersa, respectivamente, definidas no modelo físico.

Para a modelagem dos efeitos de empuxo sobre uma partícula de fluido, são utilizados os termos  $\vec{\nabla}p$  e  $\rho\vec{g}$ . Tem-se que a pressão fluido-estática promove o empuxo. Neto (2020) discorre sobre o cuidado a ser tomado no que tange as condições de contorno, pois a correta recuperação do campo de pressão fluido-estática depende da solução das equações de balanço.

As condições de contorno adotadas para as componentes da velocidade do escoamento foram condição Neumann para a face superior do domínio e condição de Dirichlet para as restantes. Para a pressão foram adotadas condição de Dirichlet para a face superior e condição de Neumann para as restantes.

### 2.3 Modelo Computacional

Os parâmetros computacionais foram definidos de acordo com as Tab. 1 e Tab. 2. Para a malha adaptativa, foram utilizados 3 níveis de refinamento. O domínio computacional utilizado tem dimensões  $[0, 048; 0, 096; 0, 048]$  em X, Y e Z respectivamente. Os termos advectivos das equações de balanço são discretizados na forma não divergente.

Tabela 2. Parâmetros utilizados na simulação computacional.

Multigrid	24X48X24
Passo de tempo (s)	$5,00 \cdot 10^{-5}$
Tempo final (s)	$2,00 \cdot 10^{-1}$
Níveis de refinamento	3
Raio da esfera estacionária (m)	$5,00 \cdot 10^{-3}$
Posição da esfera estacionária (m)	$[2,40 \cdot 10^{-2}; 2,40 \cdot 10^{-2}; 2,40 \cdot 10^{-2}]$
Raio da gota (m)	$1,00 \cdot 10^{-2}$
Posição da gota (m)	$[2,40 \cdot 10^{-2}; 7,20 \cdot 10^{-2}; 2,40 \cdot 10^{-2}]$
Tamanho específico do elemento de malha da esfera	$6,61 \cdot 10^{-4}$

A malha da esfera estacionária foi gerada através do software Gmsh. Na Fig 2 tem-se a visualização da malha gerada.

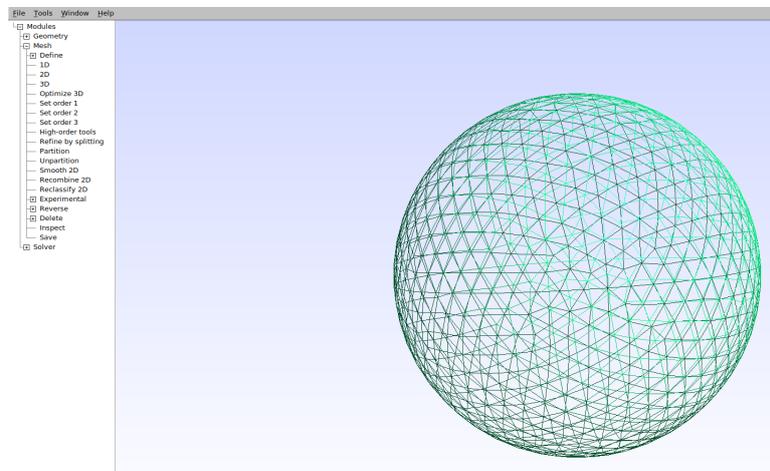


Figura 2. Malha gerada da esfera estacionária

Para a simulação computacional foi utilizado o software MFSim desenvolvido no Laboratório de Mecânica dos Fluidos (MFLab) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

### 3. RESULTADOS

No trabalho de Deen (2006) tem-se os resultados do processo de deformação da gota e seu avanço em direção a esfera estacionária, colisão, e deslocamento para a parte inferior do domínio.

Na Figura 3 tem-se os resultados obtidos referente aos mesmos tempos de análise, utilizando a densidade como parâmetro de visualização. Os resultados obtidos foram semelhantes aos de Deen (2006). Comparando o desenvolvimento ao longo do tempo do deslocamento da gota, obteve-se que o seu impacto ocorreu em alguns instantes antes do tempo obtidos no artigo de referencia. As imagens foram geradas através do software ParaView.

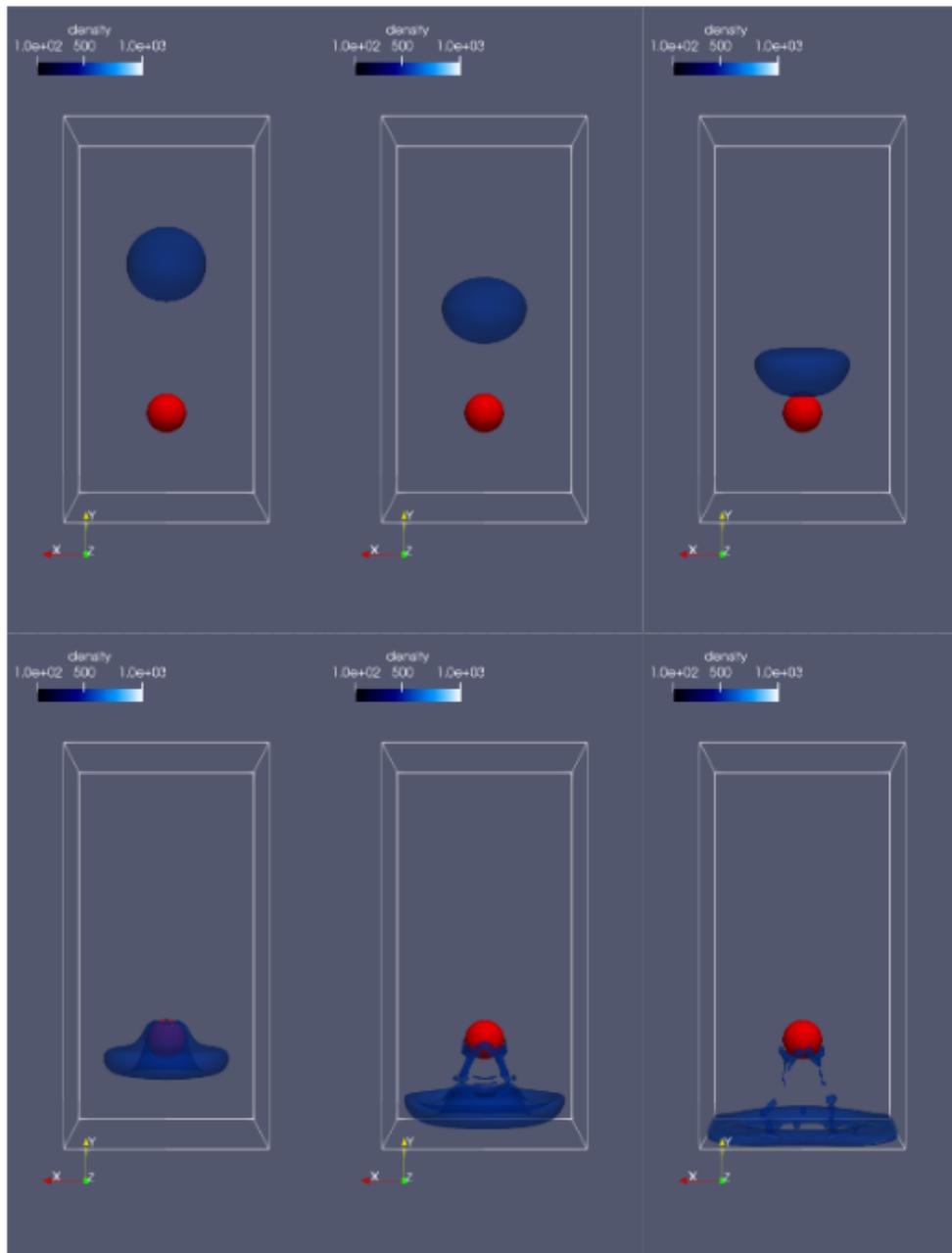


Figura 3. Resultado obtidos nos tempos de 0,050 s; 0,075 s; 0,100 s; 0,125 s, 0,150 s e 0,175 s

Na Figura 4 tem-se a visualização 2D do escoamento na direção normal ao plano Z, para o tempo de 0,100 s. Neste tempo a gota esta iniciando o impacto com a esfera estacionário e tem-se o aumento do gradiente de pressão a montante da esfera. O comportamento da densidade dos fluidos em relação a viscosidade é semelhante. Na visualização da viscosidade, é nítido o contorno entre a fase dispersa e a fase contínua.

No instante de 0,125 s, na Fig. 5 tem-se que o gradiente de pressão torna-se mais intenso a jusante da esfera. Neste instante a gota esta finalizando o deslocamento em torno da superfície da esfera.

Para o instante de 0,150 s, na Fig. 6, a gota se encontra a jusante da esfera, com grandes deformações comparada

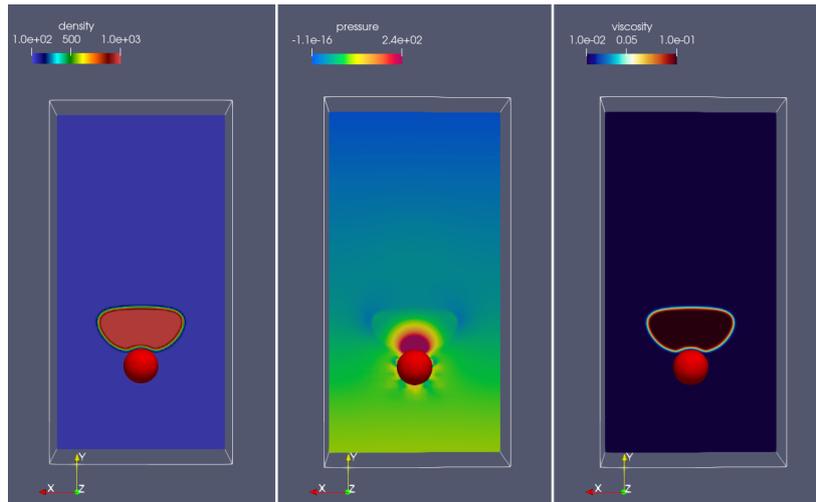


Figura 4. Comparação da densidade, pressão e viscosidade do escoamento para o tempo de 0,100 s

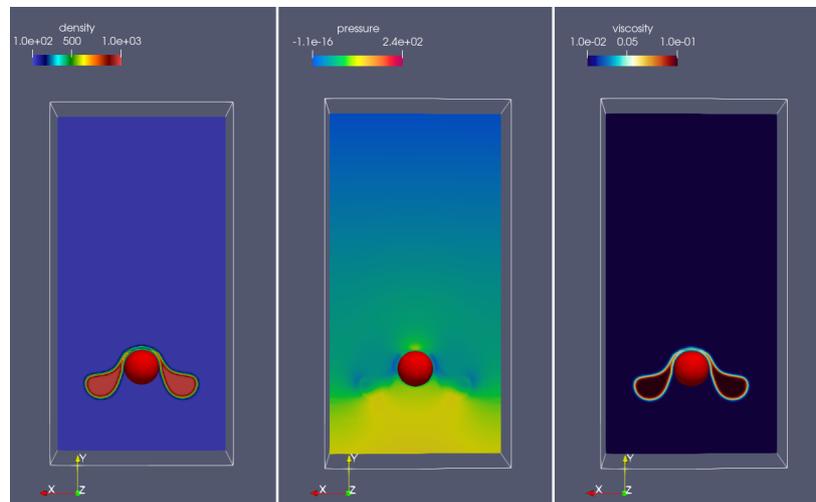


Figura 5. Comparação da densidade, pressão e viscosidade do escoamento para o tempo de 0,125 s

ao seu instante inicial. Neste tempo, o gradiente de pressão é maior na parte inferior do domínio e tem-se o início do impacto da gota com esta parte do domínio. Além disso, nota-se que algumas partículas da fase dispersa estão aderidas na superfície da esfera.

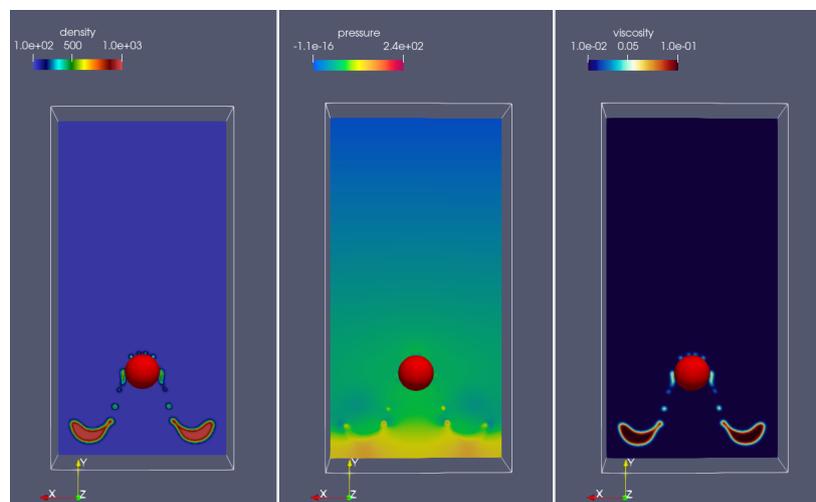


Figura 6. Comparação da densidade, pressão e viscosidade do escoamento para o tempo de 0,150 s

#### 4. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, é compreendida a importância e o entendimento das metodologias VOF, IB e malha adaptativa para a correta obtenção de resultados no que tange a dinâmica dos fluidos computacional. Os resultados obtidos são considerados satisfatórios comparando com os resultados apresentados por Deen (2006), no quesito do escoamento do impacto da gota sobre uma esfera estacionária. Além do comportamento do campo de pressão em relação ao tempo em que a gota se encontrava a montante e a jusante da esfera estacionária, que possuiu gradientes de pressão significativos, instantes anterior ao impacto e instantes posterior ao impacto. Para trabalhos futuros busca-se o estudo mais aprofundado dos escoamentos multifásicos.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Este projeto foi apenas possibilitado pela existência de um grupo PET (Programa de Educação Tutorial) integrado à Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU. O custeio, a estrutura e o apoio proporcionados pelo FNDE por meio das bolsas foram fundamentais para o sucesso alcançado.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Deen, N.G., M.V.S.A.e.J.K., 2006. “Direct numerical simulation of complex multi-fluid flows using a combined immersed boundary (ib) and volume of fluid (vof) approach”. *Fifth International Conference on CFD in the Process Industries*.
- Gomes da Silva, A.T. e Castelo Filho, A., 2018. “Desenvolvimento da técnica vof para o sistema hig-flow”. *Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics*, Vol. 6, No. 2.
- Hirt e Nichols, B.D., 1981. “Volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries”. *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, pp. 201–225.
- Lima, R.S., 2012. *Desenvolvimento e implementação de malhas adaptativas bloco-estruturadas para computação paralela em mecânica dos fluidos*. Ph.D. thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.
- Neto, A.S., 2020. *Escoamentos turbulentos: análise física e modelagem teórica*. Composer, Uberlândia, 1st edition.
- Petri, L.A., 2010. *Métodos de fronteira imersa em mecânica dos fluidos*. Master’s thesis, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação-ICMC-USP, São Carlos, Brasil.
- Silva Melo, R.R., 2017. *Modelagem e simulação de escoamentos turbulentos com efeitos térmicos, utilizando a metodologia da fronteira imersa e malha adaptativa*. Ph.D. thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

#### 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.