

Modelagem matemática em dinâmica dos fluídos: uma aplicação do método Smoothed-particle Hydrodynamics

Mathematical modeling in fluid dynamics: an application of the Smoothed-particle-Hydrodynamics Method

Modelado matemático em dinâmica de fluidos: uma aplicación del método Smoothed-particle Hydrodynamics

Recebido: 30/05/2020 | Revisado: 01/06/2020 | Aceito: 05/06/2020 | Publicado: 10/06/2020

Neylan Leal Dias

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9659-8825>

Universidade Federal do Amapá, Brasil

E-mail: neylanmatematico@gmail.com

Simone de Almeida Delphim Leal

ORCID: <https://orcid.org/0000-00027346-3159>

Universidade Federal do Amapá, Brasil

E-mail: leal@unifap.br

Analice Costacurta Brandi

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0696-6629>

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Brasil

E-mail: analice@fct.unesp.br

Messias Meneguetti Jr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2486-7181>

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Brasil

E-mail: messias@fct.unesp.br

Jose Manoel Balthazar

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6082-4832>

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Brasil

E-mail: jmbalthazar@gmail.com

Resumo

Nos últimos anos, alguns códigos SPH tornaram-se uma parte inerente do arsenal numérico de laboratórios industriais de pesquisa e desenvolvimento e instituições acadêmicas. A capacidade do SPH lidar com as questões de densidade variável e escoamentos diversos, decorre do fato de sua natureza ser totalmente lagrangiana. A ideia do método é acompanhar o fluido por meio das partículas em movimento, sem qualquer restrição de malha. O objetivo deste trabalho é modelar a dinâmica do fluido presente no fenômeno ruptura de barragens através do Método numérico livre de malhas SPH, além disso comparar os resultados simulados com resultados laborais. Os estudos realizados forneceram subsídios para a modelagem do problema da ruptura de barragem através do software SPHysics (open source), com a metodologia SPH, onde o método se mostrou eficiente na modelagem proposta, o que se torna evidente através da comparação com os resultados laborais, como mostrado nos resultados.

Palavras-chave: Hidrodinâmica de Partículas Suavizadas; Ruptura de Barragens; SPHysics.

Abstract

In recent years, some SPH codes have become an inherent part of the numerical arsenal of industrial research, development laboratories and academic institutions. SPH's capacity to deal with issues of varying density and different flows, stems from the fact that its nature is totally Lagrangian. The idea of the method is to follow the fluid through the moving particles, without any mesh restriction. The objective of this work is to model the dynamics of the fluid present in the phenomenon of rupture of dams through the SPH mesh-free numerical method, in addition to comparing the simulated results with labor results. The studies carried out provided subsidies for modeling the dam rupture problem using the SPHysics software (open source), with the SPH methodology, where the method proved to be efficient in the proposed modeling, which becomes evident through the comparison with the labor results, as shown in the results.

Keywords: Smoothed Particle Hydrodynamics; Dam Break; SPHysics.

Resumen

En los últimos años, algunos códigos SPH se han convertido en una parte inherente del arsenal numérico de la investigación industrial, los laboratorios de desarrollo y las instituciones académicas. La capacidad de SPH para lidiar con problemas de densidad variable y flujos diferentes, se debe al hecho de que su naturaleza es totalmente lagrangiana.

La idea del método es seguir el fluido a través de las partículas en movimiento, sin ninguna restricción de malla. El objetivo de este trabajo es modelar la dinámica del fluido presente en el fenómeno de ruptura de presas a través del método numérico sin malla SPH, además de comparar los resultados simulados con los resultados del trabajo. Los estudios realizados proporcionaron subsidios para modelar el problema de ruptura de presas utilizando el software SPHysics (código abierto), con la metodología SPH, donde el método demostró ser eficiente en el modelado propuesto, lo que se hace evidente a través de la comparación con los resultados laborales, como se muestra en los resultados.

Palabras clave: Hidrodinámica de Partículas Alisadas; Ruptura de la presa; SPHysics.

1. Introdução

Em meados da década de 1990 (Monaghan, 1994) fez uma primeira tentativa de usar SPH para fluidos simples, ou seja, aplicou-se à hidráulica de superfície livre encontrada na vida cotidiana. Para isto, Monaghan apresentou duas ideias básicas, mas úteis, para resolver os problemas: aproximar densidade constante e impor limites rígidos. A ideia de impor uma densidade constante equivale a uma condição quase incompressível, ou seja, uso da equação de estado com velocidade de som suficientemente grande que não impedisse simulações. Esta é a variante conhecida atualmente como WCSPH (SPH quase compressível).

Surpreendentemente, o tratamento da superfície livre não exigiu cuidado especial nessa tentativa inicial. Este primeiro sucesso revelou-se tão impressionante que a comunidade de modeladores do SPH na hidráulica cresceu rapidamente desde meados da década de 1990, propondo novas ideias e melhorias para o modelo simples original de Monaghan.

Desde o seu nascimento em 1977, o Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) tem sido melhorado, atingindo resultados promissores. Isso se deve a um intenso esforço teórico pela comunidade trabalhando nesta área e também a uma evolução na capacidade computacional, principalmente em computação paralela. Por ser um método sem malha e relativamente recente já é considerado uma ferramenta promissora em aplicações industriais e ambientais, pois pode ser usado com certa facilidade para problemas com geometrias complexas e fronteiras livres (Violeau & Rogers, 2016).

Nos últimos anos, alguns códigos SPH tornaram-se uma parte inerente do arsenal numérico de laboratórios industriais de pesquisa e desenvolvimento e instituições acadêmicas.

Existem várias razões que explicam seu sucesso (Violeau & Rogers, 2016): (1) a crescente necessidade da indústria e pesquisa em utilizar ferramentas apropriadas para solução numérica de modelos hidrodinâmicos complexos; (2) avanços recentes na teoria SPH que resolveram uma série de problemas deste método; e (3) o surgimento das unidades de processamento gráfico (GPUs) que permitem aos códigos SPH a simulação de escoamentos tridimensionais complexos em escalas reais, mantendo tempos computacionais razoáveis.

O SPH foi originalmente desenvolvido para a modelagem astrofísica, onde a densidade do fluido pode variar no espaço e com o tempo em algumas ordens de grandezas e na ausência de fronteiras físicas. A capacidade do SPH lidar com as questões de densidade variável e escoamentos diversos, decorre do fato de sua natureza ser totalmente lagrangiana. A ideia do método é acompanhar o fluido por meio das partículas em movimento, sem qualquer restrição de malha.

O sucesso do SPH na hidráulica é devido à sua extraordinária capacidade de simular uma variedade de escoamentos complexos, envolvendo um amplo espectro de processos físicos. As principais características e mais interessantes (Violeau & Rogers, 2016), permitem lidar com: superfícies livres com deformações acentuadas e rápida movimentação sem qualquer restrição em relação às suas topologias; escoamentos altamente não-lineares, dominados por inércia e processos de impacto; escoamentos multi-fluidos e multi-físicos; interação fluido/estrutura, incluindo o movimento rígido do corpo em um acoplamento fluido e fluido/elasticidade; facilidade de programação (pelo menos para o básico), seja em 2-D ou 3-D.

Uma das características atraentes do SPH é seu caráter variacional, que mantém harmonia com os fundamentos da mecânica lagrangiana e hamiltoniana (para fenômenos não dissipativos). Desde seu uso na hidráulica, o SPH foi aplicado a diversos problemas na pesquisa de escoamentos e engenharia hidráulica. Apresentando relativa facilidade, as simulações SPH foram capazes de produzir resultados para casos não-lineares complicados e muitas vezes fenômenos multifísicos.

Com pouca modificação da metodologia básica, o SPH conseguiu gerar resultados em estreita concordância com soluções de referência/dados em testes de validação, sem algoritmos altamente sofisticados exigidos em esquemas baseados em malha. A maioria dos campos acima mencionados são considerados muito difíceis (para não dizer impossíveis) para outros métodos numéricos.

No modelo de escoamento com superfície livre, o SPH tem rivalizado com o método dos volumes finitos e de outras abordagens dedicadas a esse tipo especial de escoamento. Além disso, o progresso recente em sanar aspectos numéricos antes deficitários do SPH, aumentam a credibilidade no uso do método e faz crescer a comunidade que se dedica a esta abordagem.

O rompimento de barragens é uma modalidade de desastres consideravelmente recorrente na história da humanidade. Dois são os principais fatores que podem ser apontados como causa primária desse evento: o advento de um fenômeno natural intenso responsável por abalar a estrutura da barragem ou o mau planejamento dessa estrutura que independentemente de fatores externos entra em colapso em razão dos erros de cálculos dos engenheiros (Alves, 2015).

O problema da quebra de barragens foi introduzido pela primeira vez por Stokes (1957). Este problema consiste em ter um espaço fechado cheio de água; a barreira para um lado é então removida e a água pode fluir livremente para dentro do vazio. Para essa simulação é utilizado um código 2D-SPH (2D-SPHysics). A ruptura da barragem é simulada com diferentes combinações de opções de compilação que modificam o tratamento numérico e teórico da modelagem. Assim, os diversos resultados do método SPH são comparados entre si e, também, com os dados experimentais existentes, para se encontrar uma combinação adequada que forneça a melhor precisão para a simulação.

2. Metodologia

Nesta seção são apresentadas as discretizações das equações que modelam os escoamentos de fluidos, usando SPH. Considera-se que o fluido tem uma baixa compressibilidade e, portanto, se pode usar uma equação de estado para a relação entre pressão e densidade.

Conservação de Quantidade de Movimento

A equação de conservação de quantidade de movimento é dada por

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \mathbf{g} + \mathbf{\Gamma}, \quad (1)$$

Γ são os termos difusivos relacionados às forças de viscosidade, $\mathbf{g} = (0, 0, -9.81)ms^{-2}$ é a aceleração gravitacional, ρ é a massa específica, \mathbf{v} é a velocidade, P é a pressão e ∇P é a força devido a pressão, por unidade de volume.

A equação (1) é descrita para um fluido Newtoniano. A equação de quantidade de movimento geralmente é tratada em sua forma invíscida, assim para se ter em conta o termo viscoso, é utilizado a viscosidade artificial.

Equação de Estado

A pressão é calculada através da equação de Tait,

$$P = B \left(\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right), \quad (2)$$

onde $B = \frac{c^2 \rho_0}{\gamma}$, é o termo relacionado às flutuações das massas específicas do fluido, ρ_0 é a massa específica de repouso do fluido e $\gamma = 7$ e c é a magnitude da velocidade de propagação do som no fluido.

Conservação de Massa

Como o fluido aqui tratado é a água, no SPH, é considerado como fracamente compressível (ou quase-compressível). Assim, a discretização da densidade como uma função, fica na forma da equação

$$\langle \rho_i \rangle \geq \sum_{b=1}^N m_b W_{ab}. \quad (3)$$

que é utilizada em problemas onde não há mudança considerável da massa específica, com fluido quase-compressível (Monaghan, 2005).

Conservação de Energia

A energia cinética, potencial e térmica associada a cada partícula usando viscosidade artificial, na notação SPH é calculada pela expressão dada por (Monaghan, 1992).

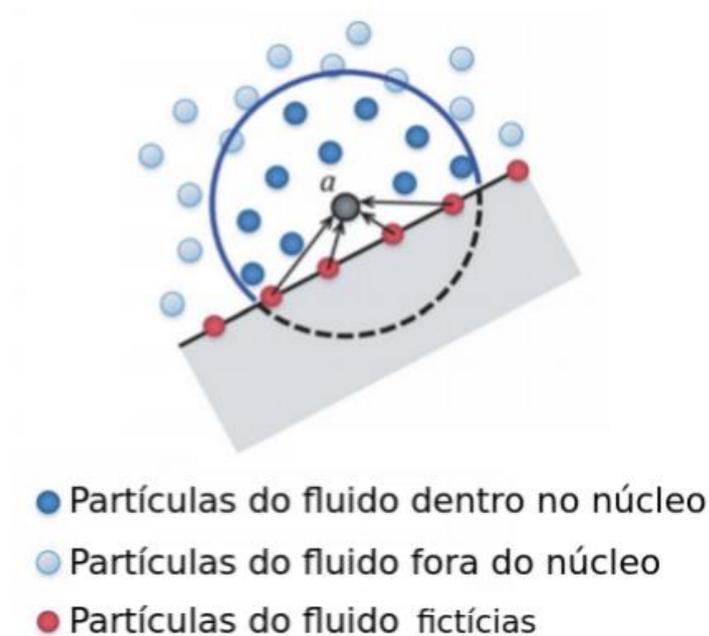
$$\frac{de_a}{dt} = \frac{1}{2} \sum_b \left(\frac{P_a}{\rho_a^2} + \frac{P_b}{\rho_b^2} + \Pi_{ab} \right) v_{ab} \nabla_a W_{ab} \quad (4)$$

onde Π_{ab} é o termo de viscosidade artificial. A energia total do sistema é calculada como a soma da energia cinética e potencial.

Tratamento de Fronteira

A imposição de fronteiras sólidas impermeáveis é essencial para a aplicação de ruptura de barragens, em que o uso de funções repulsivas é necessário, como pode ser observado na figura 1. Devido o desprendimento de partículas do fluido, há uma identificação de partículas para evitar efeitos espúrios, que no SPHysics é chamado de “Verificação dos Limites” (Crespo, 2008).

Figura 1: Condição de Repulsão.

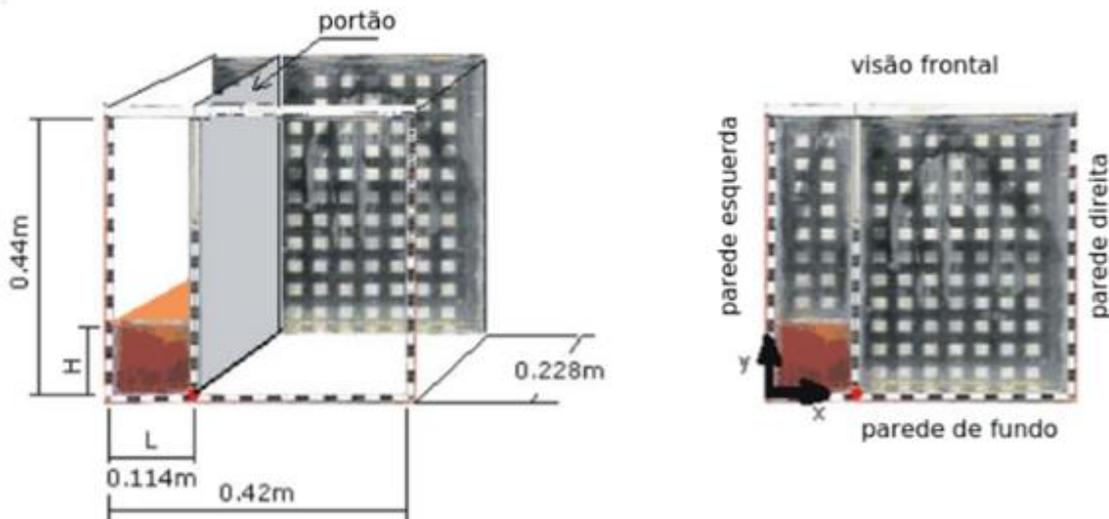


Fonte: Violeau & Rogers, 2016.

3. Resultados

Frente de onda: validação experimental

Figura 2: Geometria do tanque para validação experimental.



Fonte: Cruchaga, et al., 2007.

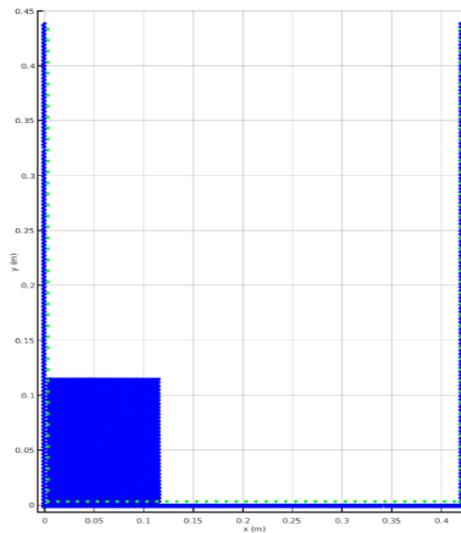
Um experimento é desenvolvido em (Cruchaga et al., 2007) que fornece dados da evolução da frente de onda com propriedades de fluidos diferentes. Dentre estes é utilizado a água, com a geometria descrita na figura 1. As figuras 4 e 5 apresentam algumas comparações das simulações, usando o SPHysics com os resultados experimentais de (Cruchaga et al., 2007), usa-se a seguinte equação para o cálculo das frentes de onda (Fraga, 2014):

$$\Delta x_p = \left(\frac{x_{exp} - x_{SPH}}{x_{exp}} \right) \quad (5)$$

onde: Δ é a diferença percentual entre as abscissas das frentes de onda, obtidas experimentalmente e pelo SPH, x_{exp} é abscissa da frente de onda obtida experimentalmente, x_{SPH} é abscissa da frente de onda obtida pelo SPH.

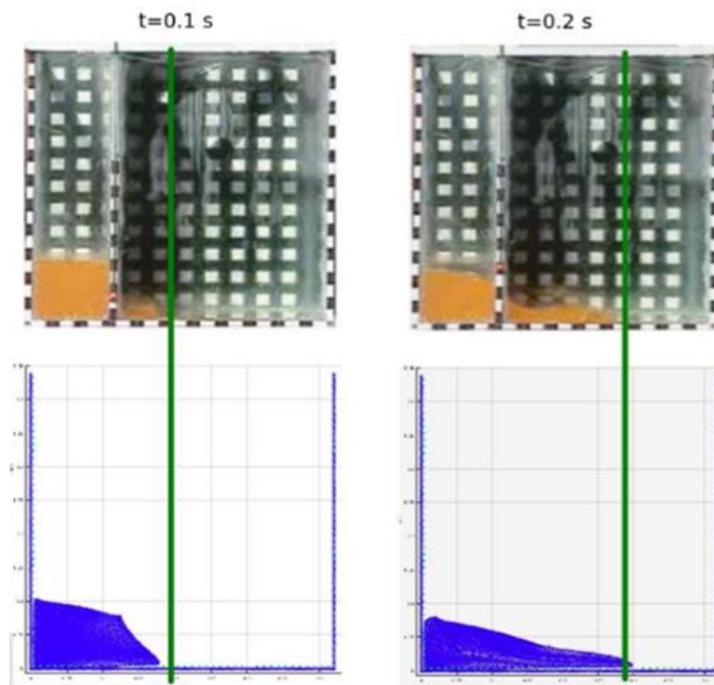
Na Figura 3 está disposta a configuração inicial do tanque para as simulações, com a finalidade de comparar com os resultados experimentais. A geometria contém 3369 partículas. Pelos resultados expostos na Tabela (2) pode-se constatar que a diferença entre a frente de onda da simulação e os resultados experimentais é bem pequena. Observa-se que com a evolução do passo temporal o erro percentual decai. Quando utilizado $\alpha = 0.3$ foi possível alcançar melhores resultados.

Figura 3: Geometria para simulações.



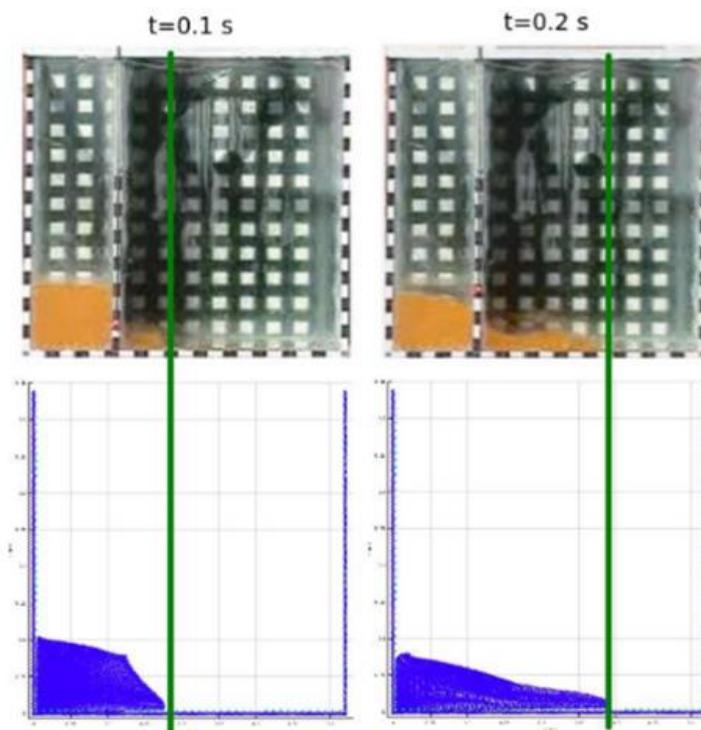
Fonte: Os autores.

Figura 4: Comparação com modelo experimental, para $\alpha = 0.2$.



Fonte: Os autores.

Figura 5: Comparação com modelo experimental, para $\alpha = 0.3$.



Fonte: Os autores.

Tabela 1: Resultados das Figuras 4 e 5.

	Tempo(s)	x_{exp}	x_{SPH}	Erro Percentual
$\alpha = 0.2$	0.1	19.0	17.7	6.84
	0.2	29.0	29.7	-2.41
$\alpha = 0.3$	0.1	19.0	17.5	7.89
	0.2	29.0	29.1	-0.34

Fonte: Os autores.

4. Considerações Finais

Os estudos realizados forneceram subsídios para a modelagem do problema da ruptura de barragem através do software SPHysics (open source), com a metodologia SPH. A formação nesta área do conhecimento se mostra muito importante, tendo em vista que o método estudado abrange várias áreas de aplicações, possibilitando diversos estudos durante muitos anos de pesquisa.

O SPHysics é um código aberto que se mostrou muito útil para a simulação do problema da ruptura de barragem, além de apresentar opções que ainda podem ser exploradas. Foi possível analisar o uso da viscosidade artificial e observar que esta é uma ferramenta muito importante para o escoamento do fluido, conforme pode ser visto nas comparações realizadas com o modelo experimental.

A partir da experiência obtida será possível, em trabalhos futuros, explorar outros casos que o SPHysics possa ajudar. Ainda, para o problema da ruptura de barragem, pode-se modelar a ruptura de barragem no caso 3D, ou, ainda, no caso 2D considerar obstáculos no escoamento do fluido. Outra possibilidade de trabalho futuro envolve problemas com geometria mais exigentes, bem como casos de escoamentos de fluidos multifásicos. Nesta direção grupos internacionais pesquisam ativamente, por exemplo, desenvolvendo o software DualPhysics que já inclui paralelização que aumenta significativamente a performance nas simulações.

Referências

Alves, H.R. (2015). o rompimento de barragens no Brasil e no Mundo: Desastres mistos ou tecnológicos?. Disponível em <http://www.domhelder.edu.br/uploads/artigo_HRA.pdf >. Acesso em 02 de junho de 2020.

Crespo, A.J. (2008). Application of the Smoothed Particle Hydrodynamics model SPysics to free-surface hydrodynamics. PhD thesis, Universidade de Vigo, Vigo-ESP.

Cruchaga, E.T., Celentano, M.A. & Tayfun, D.J. (2007) . Collapse of a liquid column: numerical simulation and experimental validation. *Comput. Mech.*, 39:453476.2007.

Fraga, F.D.C. (2014). Estudo da fase gravitacional-inercial do espalhamento de óleo em mar calmo empregando o método lagrangiano de partículas Smoothed Particle Hydrodynamics. PhD thesis, UFES, Espírito Santo.

Monaghan, J.J. (1992). Smoothed particle hydrodynamics. *Annual Rev. Astron. Appl.*, 30:543574.

Monaghan, J.J. (1994). Simulating free surface flows with sph. *Journal of Computational Physics*, 110:399406.

Monaghan, J.J. (2005). Conduction modelling using smoothed particle hydrodynamics. *Reports on Progress in Physics*, 68:17031759.

Violeau, B.D. & Rogers, D. (2016). Smoothed particle hydrodynamics (sph) for free-surface flows: past, present and future. *Journal of Hydraulic Research*, 54:126.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Neylan Leal Dias – 20%

Simone de Almeida Delphim Leal – 20%

Analice Costacurta Brandi – 20%

Messias Meneguetti Jr – 20%

Jose Manoel Balthazar – 20%